

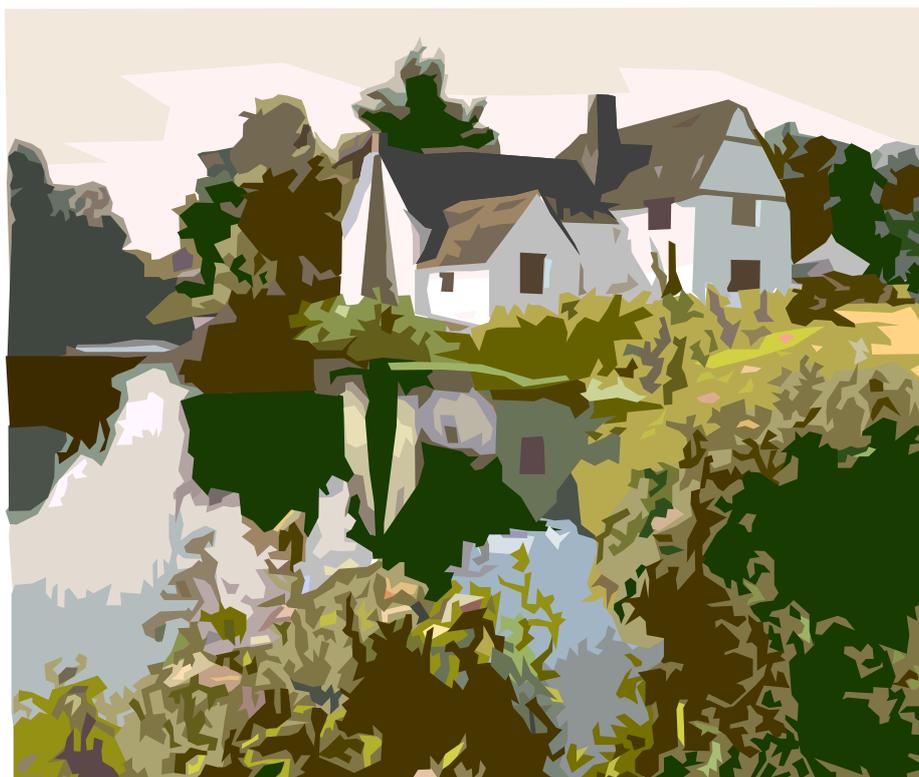
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ

ФГБОУ ВО БРЯНСКИЙ ГАУ

Демина О.Н., Зверева Л.А.

**Исследование взаимодействия природных и  
природно-техногенных систем**

Учебно-методическое пособие для студентов направления  
подготовки 20.04.02 – Природообустройство и водопользование



Брянская область 2020

УДК 631.6.02 (07)  
ББК 65.28  
Д 30

Демина, О. Н. Исследование взаимодействия природных и природно-техногенных систем: учебно-методическое пособие для студентов направления подготовки 20.04.02 Природообустройство и водопользование / О. Н. Демина, Л. А. Зверева. - Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2020. – 63 с.

Учебно-методическое пособие «Исследование взаимодействия природных и природно-технических систем» для студентов направления подготовки 20.04.02 Природообустройство и водопользование.

Рецензент: кандидат технических наук, доцент Широбокова О.Е.

*Рекомендовано методической комиссией института энергетики и природопользования Брянского ГАУ, протокол № 2 от 28 октября 2020 года.*

© Брянский ГАУ, 2020  
© Демина О.Н., 2020  
© Зверева Л.А., 2020

## Содержание

Введение.....	4
1. Вопросы к экзамену .....	6
2. Учебная литература .....	7
3. Задание 1. Определение изменения минерализации грунтовых вод на мелиоративных системах .....	8
4. Задание 2. Исследование процесса заиления горизонтального отстойника...14	
5.Задание 3. Мелиоративные системы и охрана вод.....	27
6. Задание 4. Прогноз подъема уровня подземных вод на мелиоративных систе- мах за счет техногенных факторов .....	33
7. Задание 5. Водная миграция.....	40
8. Задание 6. Расчёт разбавления сточных вод в водотоке.....	44
9. Задание 7. Экономический оптимум загрязнения окружающей среды.....	54
10. Тесты по дисциплине: «Исследование систем природо-обустройства и водопользования» .....	58
10. Библиографический список .....	62

## ВВЕДЕНИЕ

Цель дисциплины - формирование у студентов системы знаний по анализу функционирования систем природо-обустройства и водопользования, по определению способов их совершенствования и реконструкции, разработке новых технологий.

В результате изучения рассматриваемого курса студенту следует уметь, используя различные средства и методы, получать и использовать информацию из различных источников, а также интерпретировать полученные данные для формирования суждений по профессиональным и социальным проблемам.

В результате освоения дисциплины у обучающегося формируются следующие компетенции:

### **3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**ПК-1** способностью определять исходные данные для проектирования объектов природообустройства и водопользования, руководить изысканиями по оценке состояния природных и природно-техногенных объектов.

**ПК-5** способностью использовать знания водного и земельного законодательства и правил охраны водных и земельных ресурсов для проверки их соблюдения при водопользовании, землепользовании и обустройстве природной среды.

## Тематический план

### **1. Природно-техногенные комплексы как объекты природообустройства.**

Геосистемы, ландшафты и их свойства. Геосистемный подход к формированию и созданию ПТК. Техногенные воздействия на геосистемы и их устойчивость. Трансформация природной геосистемы при создании и формировании ПТК и анализ его воздействий на природные объекты.

**2. Основные виды ПТК в области природообустройства и водопользования.** Основные виды ПТК в области природообустройства и их составные элементы и структурная характеристика: водохозяйственные системы, инженерно-мелиоративные системы, инженерно-экологические системы. Нормы техногенного воздействия на природные объекты. ПТК с комплексами природоохранных мероприятий. Использование водооборота при создании ПТК.

**3. Функциональные процессы взаимодействия ПТК и природных геосистем.** Движение воздушных масс. Энергетические потоки в геосистемах. Круговой оборот воды, движение почвенной влаги и подземных вод. Геохимический круговорот веществ. Биотический круговорот веществ. Основы моделирования ПТК. Моделирование гидравлических процессов ПТК.

### **4. Оценка взаимодействия ПТК и прилегающих природных геосистем.**

Воздействие ПТК на гидрогеологический режим. Установление зон влияния мелиоративных ПТК и определение их размеров. Оценка снижения уровня грунтовых вод на прилегающей территории при создании мелиоративных ПТК. Оценка подъема уровня грунтовых вод на прилегающей территории при создании в/х ПТК. Воздействие ПТК на речной сток. Оценка воздействия на гидрологический режим водных объектов.

Оценка химического загрязнения водных объектов. Оценка потери гумуса при строительстве ПТК. Оценка эрозионной устойчивости природных геосистем. Оценка трансформации мелиорируемых торфяников. Оценка противопожарной водообеспеченности мелиорируемых торфяников. Ландшафтно-экологическая оценка преобразуемой территории при создании мелиоративных ПТК.

## Вопросы к экзамену

1. Подходы к изучению взаимодействия природных и природно-техногенных систем.
2. Нормы нагрузок, характер воздействий и показатели устойчивости природных и природно-техногенных систем.
3. Уровни размерности, показатели, характеризующие основные виды антропогенного воздействия.
4. Методы исследования степени антропогенной преобразованности природно-техногенных систем.
5. Показатели оценки степени антропогенной преобразованности природно-техногенных систем
6. Характеристика изменений природных комплексов в зоне воздействия мелиоративных систем.
7. Миграция химических веществ в результате взаимодействия природных и техногенных систем.
8. Факторы, вызывающие миграцию химических веществ.
9. Характеристика и классификация геохимических барьеров.
10. Искусственные геохимические барьеры.
11. Эколого-геохимические функции техногенных физико-химических барьеров.
12. Эвтрофирование водоемов.
13. Экологические сукцессии в водоемах.
14. Методы исследования и оценки степени антропогенной преобразованности природно-техногенных систем.
15. Методы исследования и оценки степени антропогенной преобразованности природно-техногенных систем.
16. Методы исследования и оценки влияния гидротехнических сооружений на природные системы.
17. Определение изменения минерализации грунтовых вод на мелиоративных системах.
18. Анализ процессов заиления природно-техногенных и природных систем.
19. Расчет подъема уровня грунтовых вод вследствие создания водохранилища.
20. Расчет подъема уровня подземных вод на мелиоративных системах за счет техногенных факторов.
21. Миграция тяжелых металлов в почвенном профиле.
22. Расчет коэффициента водной миграции.
23. Расчет разбавления сточных вод в водотоке природной системы

## Учебная литература:

1. Ишанова О.С., Гривко Е.В. Оценка степени антропогенной преобразованности природно-техногенных систем: учеб. пособие. Оренбург: ОГУ, 2013. <http://rucont.ru/efd/225097>.
2. Природообустройство / А.И. Голованов, Ф.М. Зимин и др. М.: КолосС, 2008.
3. Кашников В.И. Методика оценки экологической устойчивости природно-техногенных систем // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. 2007. № 1. С. 52-56. <http://elibrary.ru/item.asp?id=9587887>.
4. Курейчик В.В., Курейчик В.В. Обзор и анализ методов и моделей, инспирированных природными системами // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2013. № 2 (13). С. 10-22. <http://elibrary.ru/item.asp?id=22264389>.
5. Зверева Л.А., Кровопускова В.Н. Метод. пособие по изучению дисциплины «Природопользование». Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2015.
6. Мидоренко Д.А., Краснов В.С. Мониторинг водных ресурсов: учеб. пособие. Тверь: Тверской гос. ун-т, 2009. 77 с. <http://window.edu.ru/resource/893/77893>.
7. Татаринцев Л.М. Основы рационального природопользования: основы землеустройства: учеб. пособие. В 3 ч. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2007. Ч. II. 111 с. <http://window.edu.ru/resource/638/77638>.
8. Техногенные системы и экологический риск: метод. материалы и рабочая программа по курсу. Омск: ОмГУ, 2005. 20 с. <http://window.edu.ru/resource/529/42529>.

# Задание 1

## Определение изменения минерализации грунтовых вод на мелиоративных системах

Для оценки и прогноза изменений мелиоративных процессов происходящих в природно-техногенном комплексе широко используется расчётный метод. При этом методе используются данные элементарных анализов и несложных расчетов.

**Задача 1.1** Определить изменения минерализации грунтовых вод на мелиоративных системах и возможное поступление солей в почву из грунтовых вод при их испарении и транспирации.

Таблица 1.1- Задания по вариантам

Номер варианта	$C_1$ г/л	s	$\alpha$	d г/см <sup>3</sup>	m	$\alpha$	H мм	h см
1	2	0,75	1	1,4	0,44	1	190	1,1
2	1,5	0,77	0,95	1,6	0,41	1	194	1,2
3	1,75	0,79	0,95	1,8	0,4	1	196	1,3
4	2,25	0,81	1	1,9	0,39	1	198	1,25
5	2,15	0,83	0,95	2,1	0,42	1	202	1,4
6	2,45	0,82	1	1,7	0,43	1	204	1,5

Возможное изменение минерализации грунтовых вод определяется по формуле:

$$C_2 = \alpha \cdot C_1 + \frac{\alpha \cdot s \cdot d}{m}, \text{ г/л} \quad (1.1)$$

где  $C_2$  - прогнозируемая минерализация грунтовых вод, г/л;

$C_1$  - исходная минерализация грунтовых вод, г/л;

s - среднее содержание солей в почво-грунте, %;

$\alpha$  - доля грунтовых вод в подъеме их уровня;

a - количество солей, переходящих из почвы в грунтовую воду в долях единицы;

d - плотность почвы, г/см<sup>3</sup>;

m - порозность в долях единицы.

$$C_2 = 1 \cdot 1,25 + \frac{1 \cdot 0,85 \cdot 1,3}{0,47} = 3,601 \text{ г/л}$$

Минерализация увеличилась на 2,357г/л

Поступление солей в почву из грунтовых вод при испарении и транспирации определяется по формуле

$$S_{\text{гр}} = \frac{C_n \cdot H}{d \cdot h \cdot 100} \text{ ,} \quad (1.2)$$

где  $S_{\text{гр}}$  - внос солей в почву (вторичное засоление определенного слоя почвы за конечный период времени), %;

$C_n$  - прогнозируемая минерализация с учетом разбавления пресными инфильтрационными водами, г/л;

$H$  - величина слоя грунтовых вод, расходуемых на испарение и транспирацию, мм;

$d$  - плотность почвы, г/см<sup>3</sup>;

$h$  - мощность верхнего слоя почвы, см.

Прогнозируемая минерализация ( $C_n$ ) с учетом разбавления пресными инфильтрационными водами составляет

$$C_n = K_{\text{разб}} \times C_2, \text{ г/л} \quad (1.3)$$

где  $K_{\text{разб}}$  – коэффициент разбавления солей,  $K_{\text{разб}} = 4$

$$C_n = 4 \times 3,601 = 14,40 \text{ г/л}$$

Вторичное засоление данного слоя почвы в первый год выразится

$$S_{\text{гр}} = \frac{4C_n \cdot H}{d \cdot h \cdot 100} \text{ \%} \quad (1.4)$$

$$S_{\text{гр}} = \frac{4 \cdot 14,40 \cdot 200}{1,3 \cdot 1,1 \cdot 100} = 80,55 \text{ \%}$$

Ввиду того, что солевой баланс составляет 80,55 % от вторичных солей %.

Следовательно, к началу второго вегетационного периода в верхнем слое почв сохранится 80,55% солей.

## Задача 1.2 Расчет минерализации дренажного стока

Задания по вариантам:

Показатели	Варианты				
	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6
1. Мощность слоя зоны аэрации, $h_{a,i}$	2,1 м	2,2 м	1,9 м	1,8 м	1,85 м
2. Мощность слоя, водо-насыщенной толщи, $h_b$	2,9 м	3,1 м	3,2 м	2,8 м	2,7 м
3. Объемный вес зоны аэрации, $\gamma_{a,i}$	1,5 г/см <sup>3</sup>	1,55 г/см <sup>3</sup>	1,4 г/см <sup>3</sup>	1,45 г/см <sup>3</sup>	1,35 г/см <sup>3</sup>
4. Предельно-полевая влагоемкость, PPW	0,29	0,27	0,26	0,25	0,3
5. Глубина заложения дрены. $a$	3,1 м	3,2 м	2,9 м	2,8 м	2,7 м
6. Радиус дрены, $r$	0,05 м				
7. Коэффициент фильтрации, $K_f$	0,2 м/сут	0,22 м/сут	0,19 м/сут	0,18 м/сут	0,2 м/сут
8. Пористость слоев водонасыщенной толщи, $n_b$	0,55	0,45	0,5	0,4	0,45
9. Среднее содержание солей в слоях зоны аэрации. $S_a$	0,5%	0,52%	0,53%	0,54%	0,49%
10. Средняя минерализация подземных вод. $C$	4,1 г/л	4,2 г/л	4,3 г/л	4,4 г/л	3,8 г/л
11. Средняя минерализация оросительных вод. $C_n$	0,21 г/л	0,22 г/л	0,23 г/л	0,24 г/л	0,25 г/л
12. Расчетная нагрузка на Дренаж. $g_d$	0,05 л/с·га	0,05 л/с·га	0,05 л/с·га;	0,05 л/с·га	0,05 л/с·га
13. Оросительная норма с учетом промывного режима. $J_{nt,n}$	4280 м <sup>3</sup> /га.	4283 м <sup>3</sup> /га.	4282 м <sup>3</sup> /га.	4281 м <sup>3</sup> /га.	4279 м <sup>3</sup> /га.

Минерализацию стока из закрытой осушительной системы рассчитывают по следующей формуле

$$C_w = C_n \frac{J_{nt,n}}{W} + \left( \frac{G_{sl}}{W_{lim}} - C_n \frac{J_{nt,n}}{W} \right) \sum_{i=1}^3 \alpha_i \chi_i e^{-\frac{\chi_i W \cdot t}{W_{lim}}} \quad , \text{г/л} \quad (1.5)$$

где  $C_n$  - средняя минерализация оросительной воды, г/л;

$W$  - объем отведенной дренажной воды за единицу времени, м<sup>3</sup>/га определяемый по формуле

Объем отведенной дренажной воды за год определяется по формуле

$$W = g_d \cdot 86,4 \cdot 365, \text{ м}^3/\text{га}, \quad (1.6)$$

где  $g_d$  - среднесуточная нагрузка на дренаж, л/с·га;

$J_{nt,n}$  - объем, поданный на поле оросительной воды на единицу времени (год), м<sup>3</sup>/га;

$G_{sl}$  - исходный запас солей в расчетной толще почво-грунтов

Исходный запас солей в расчетной толще почво-грунтов определяется по формуле

$$G_{sl} = 10^4 \left( 10 \sum_{i=1}^N h_{a,i} \gamma_{a,i} S_{a,i} + \sum_{j=1}^{N_1} h_{в,j} n_{в,j} C \right), \text{ кг/га} \quad (1.7)$$

где  $N$  - количество слоев расчетной толщи;

$N_1$  - количество слоев зоны аэрации;

$t$  - время (год);

$h_{a,i}$  - толщина  $i$ -го слоя зоны аэрации, м;

$h_{в,j}$  - толщина  $j$ -го слоя водо-насыщенной толщи, м;

$\gamma_{a,i}$  - объемная масса слоя зоны аэрации, г/см<sup>3</sup>;

$S_a$  - среднее содержание солей (ионов) в зоне аэрации, %;

$n_{в}$  - пористость водо-насыщенной толщи, доли ед.;

$W_{lim}$  - водоудерживающая способность почвогрунтов в активной зоне, м<sup>3</sup>/га;

$\alpha_i$  - относительное содержание хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов в общей сумме исходных солей, доли единицы;

$C$  - средняя минерализация подземных вод, г/л;

$\chi_i$  - параметр, учитывающий "активность" выщелачивания хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов;

$\chi_1 = 1,165$  для хлоридов;

$\chi_2 = 0,426$  для сульфатов;

$\chi_3 = 0,265$  для гидрокарбонатов.

## Пример расчета прогноза минерализации стока из горизонтальных дрен

Таблица 1.1-Исходные данные

Наименование показателей	Показатели
1.Мощность слоя зоны аэрации, $h_{a,i}$	2,0 м
2.Мощность слоя, водо-насыщенной толщи, $h_b$	3,0 м
3. Объемный вес зоны аэрации, $\gamma_{a,i}$	1,6 г/см <sup>3</sup>
4. Предельно-полевая влагоемкость, PPW	0,28
5. Глубина заложения дрены, а	3,0 м
6. Радиус дрены, r	0,05 м
7. Коэффициент фильтрации, $K_f$	0,21 м/сут
8. Пористость слоев водо-насыщенной толщи, $n_b$	0,5
9. Среднее содержание солей в слоях зоны аэрации, $S_a$	0,51%
10. Средняя минерализация подземных вод, С	4,0 г/л
11. С минерализация оросительных вод, $C_{op}$	0,2 г/л
12.Расчетная нагрузка на дренаж, $g_d$	0,05 л/с·га
13. Оросительная норма с учетом промывного режима, $J_{nf,n}$	4284 м <sup>3</sup> /га.

### Решение

Исходный запас солей в расчетной толще определяем по формуле (1.3)

$$G_{sl} = 10^4 (10 \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 0,51 + 3 \cdot 0,5 \cdot 4) = 223200 \text{ кг/га.}$$

Водоудерживающая способность почвы равна

$$W_{lim} = 10000 \cdot 3 \cdot 0,28 = 8400 \text{ м}^3/\text{га}$$

$$\frac{G_{sl}}{W_{lim}} = \frac{223200}{18768} = 26,57$$

$$C_n \frac{J_{nt,n}}{W} = 0,2 \frac{4284}{1576,8} = 0,5434$$

Объем отведенной дренажной воды равен:

$$W = 0,05 \cdot 86,4 \cdot 365 = 1576,8 \text{ м}^3 / \text{Га.}$$

Принимаем:

- относительное содержание хлоридов  $\alpha_1 = 0,5$ ;
- относительное содержание сульфатов  $\alpha_2 = 0,5$ ;
- параметр, учитывающий активность выщелачивания хлоридов  $x_1 = 1,165$ ;
- параметр, учитывающий активность выщелачивания сульфатов  $x_2 = 0,426$ .

Минерализация дренажного стока в конце первого года ( $t = 1$  год) равна

$$C_w = 0,2 \frac{4284}{1576,8} + \left( \frac{223200}{18768} - 0,2 \frac{4284}{1576,8} \right) +$$

$$+ 0,5 \cdot 1,165 \cdot e^{\frac{-1,165 \cdot 1576,81}{18768}} + 0,5 \cdot 0,426 \cdot e^{\frac{0,426 \cdot 1576,81}{18,768}} =$$

$$= 17,92 \text{ г/л.}$$

Результаты расчетов минерализации дренажного стока на 10 лет приведены в табл.1.2.

Таблица 1.2- Минерализация дренажного стока на 10 лет

Время, год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Минерализация дренажного стока, г/л	17,92	15,06	12,8	10,7	9,2	7,0	6,9	6,0	4,7	1,9

## Задание 2

### Исследование процесса заиления горизонтального отстойника

В составе водоочистных сооружений отстойники являются широко распространённым на практике сооружением, служащим для осаждения в воде грубо и тонкодисперсных частиц. При расчете отстойников важно учитывать скорости движения стоков. В отстойнике примеси попадают в область пониженных скоростей потока и транспортирующая способность его резко уменьшается, в результате на всем его протяжении вследствие заиления повышаются отметки дна отстойника. Толщина слоя заиления уменьшается от места впадения потока в отстойник к выходному сечению скорости течения уменьшаются и часть взвешенных наносов состоящих из зёрен разной крупности осаждаются, не доходя до конца отстойника, а часть имеющую длину осаждения, равную его длине, наносов выносятся за пределы отстойника. Важно, чтобы в процессе очистки стоков выходящие наносы, попадая в водоприёмник, не изменяли его мутность сверх допустимых норм. При проектировании отстойников, в которых осаждаются преимущественно тонкие фракции, как, например, в цементной пыли, содержащей от 75- 90% частиц с размерами менее 50 мкм особенно важно строго соблюдать требования СНиП. Особое внимание приходится уделять трудно осаждаемым тонким фракциям, имеющим незначительную массу в потоке воды, но огромную суммарную поверхность, на которой преимущественно и адсорбируются радионуклиды.

Зёрна наносов опускаются на дно под действием силы тяжести и за время  $dt$  проходят на глубину  $dh$  со скоростью, соответствующей гидравлической крупности зёрен  $\omega$ :

$$dt = \frac{dh}{\omega}$$

Вдоль отстойника зёрна проходят путь  $d\ell$  за время  $dt$  со средней скоростью потока  $U$  на данном отрезке пути

$$dt = \frac{dh}{\omega} = \frac{d\ell}{\nu}$$

Для любого сечения потока, таким образом, соблюдается равенство

$$\nu \cdot H = \omega \cdot \ell$$

В отстойник входит поток с мутностью  $\rho_{вх}$ . Расход входящих наносов  $\rho_{вх} \cdot Q$ , где  $Q$ - расход чистой воды. Из отстойника выходит расход наносов с меньшей мутностью  $\rho_{вых}$ :  $\rho_{вых} \cdot Q$ .

Тогда  $\frac{\rho_{вх} \cdot Q}{m}$ ,  $\frac{\rho_{вых} \cdot Q}{m}$  - объем входящих и выходящих наносов в единицу

времени,

где  $m$  – плотность наносов в отложениях.

Объем заиления отстойника от входного створа 1-1 до рассматриваемого створа 2-2 (см. рис.1.) на 1м ширины отстойника за время  $dt$  выражается следующим уравнением материального баланса

$$\varphi dW \cdot \ell = \left( \frac{\rho_{вх} \cdot q_1}{m} - \frac{\rho_{вых} \cdot q_2}{m} \right) dt, \quad (2.1)$$

где  $dW$ - приращение слоя заиления в рассматриваемом сечении 2-2, считая от входного сечения 1-1,

$q_1, q_2$  – удельный расход чистой воды на 1 п.м. в первом и во втором сечениях.

$$\text{На входе } \frac{\rho_{вх} \cdot q_1}{m} = \frac{\rho_{вх} \cdot h_{вх} \cdot W_1}{m}$$

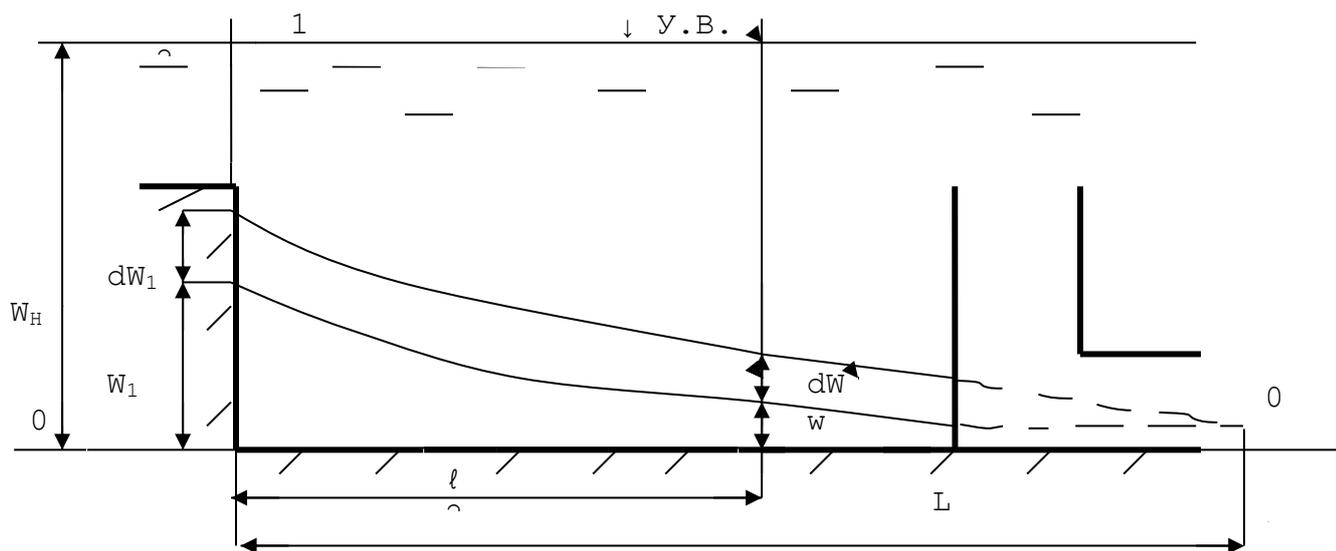


Рис.2.1. Схематизация процесса заиления отстойника.

Слой заиления на входе найдем из пропорции

$$\frac{W_1}{W} = \frac{L}{L - \ell}; \quad W_1 = \beta_1 \cdot W,$$

Тогда  $\frac{\rho_{\text{ex}} \cdot h_{\text{ex}} \cdot W_1}{m}$  будет равно  $\frac{\beta_1 \cdot h_{\text{ex}} \cdot W}{m}$ , считая, что мутность на входе

постоянна.

На входе в отстойник глубина воды определяется отметкой порога аванкамеры, которая должна быть выше дна отстойника. Здесь на коротком участке осаждаются максимальное количество наносов. Начальный участок заполняется илом быстрее, по сравнению с заилением всего отстойника, и слой ила достигает отметки входного порога или отметки ниже входного порога, которая соответствует размывающей способности входной скорости потока.

Но в такой ситуации, когда скорости течения здесь возрастают так, что даже крупные наносы уносятся потоком, слой наносов не поднимется выше порога. Если всё же заиленное дно на пороге будет повышаться, то поднимется и уровень воды, поэтому глубина воды на входном пороге останется постоянной, т.е.  $h_{\text{вх}} = \text{const}$ .

Для сечения 2-2 можно записать

$$\frac{\rho_{\text{был}} \cdot q_2}{m} = \frac{\rho_{\text{был}} \cdot v \cdot h}{m} = \frac{\rho_{\text{был}} v (W_H - W)}{m}. \quad (2.2)$$

По данным работы Деминой О.Н. [2] и скорость потока и его мутность обратно пропорциональны корню квадратному из слоя заиления  $W$  в рассматриваемом сечении.

Поэтому уравнение баланса можно представить в виде:

$$\varphi \cdot \ell \frac{dW}{dt} = \frac{\beta_1 \cdot h_{\text{ex}} \cdot W}{m} - \frac{KW(W_H - W)}{m} \quad (2.3)$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\beta_1 \cdot h_{\text{ex}} \cdot W}{m \cdot \varphi \cdot \ell} - \frac{KW(W_H - W)}{m \cdot \varphi \cdot \ell} \quad (2.4)$$

В уравнение баланса введем обобщенные параметры

$$N = \frac{\beta_1 h_{\text{ex}}}{m \cdot \varphi \cdot \ell}, \quad \mu_1 = \frac{K}{m \cdot \varphi \cdot \ell}.$$

Проведенные исследования разных природных явлений показывают, что в разных средах, сопротивление, торможение процессам оказывают продукты этих процессов, а скорость торможения процесса прямо пропорциональна квадрату количества продукта.

$$\frac{dW}{dt} = NW - \mu_1 (W_H - W)W + \mu_2 W^2 \quad (2.5)$$

Коэффициент  $\mu_2$  из условия прекращения поступления наносов во входной створ ( $NW=0$ ) находится по выражению

$$\frac{dW}{dt} = \mu_2 W^2 - \mu_1 (W_H - W)W \quad (2.6)$$

При равновесии  $\frac{dW}{dt} = 0$ , обозначим равновесный слой заиления через  $W_\infty$

$$\mu_2 = \frac{\mu_1(W_H - W_\infty)}{W_\infty}$$

С учётом выражения для  $\mu_2$  запишем уравнение баланса

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\mu_1 W_H}{W_\infty} (W - W_\infty) W \quad (2.7)$$

Интегрирование уравнения при начальных значениях  $t=0$ ,  $W=W_0$  даёт аналитическое выражение, описывающее S-образные кривые изменения слоя заиления во времени в любом створе отстойника

$$W = \frac{W_{cm}}{1 + \frac{W_{cm} - W_0}{W_0} e^{(\mu_1 W_H - N)t}}, \quad (2.8)$$

где  $W_{cm}$ - стационарный слой заиления отстойника в рассматриваемом слое.

При решении уравнения перейдя от временной координаты « $t$ » к пространственной « $\ell$ », получим уравнение изменения слоя заиления по длине отстойника на определенный момент времени

$$\frac{dW}{d\ell} = NW + \frac{\mu_1 W_H}{W_\infty} (W - W_\infty) W \quad (2.9)$$

После интегрирования при начальных значениях  $\ell=0$ ,  $W=W_0$  получаем:

$$W = \frac{W_{cm}}{1 + \frac{W_{cm} - W_0}{W_0} e^{(\mu_1 W_H - N)\ell}} \quad (2.10)$$

Для нахождения параметров  $W_{ст}$ ,  $\mu_1$ ,  $H-N$  проведём преобразования.

Уравнение (9) можно записать так

$$\frac{dW}{d\ell} \cdot \frac{1}{W} = \frac{d \ln W}{d\ell} = N + \frac{\mu_1 W_H}{W_\infty} (W - W_\infty) \quad (2.11)$$

Среднее изменение заиления для конечного отрезка длины отстойника

$$\frac{\Delta \ln W}{d\ell} = \frac{\ln W_{\ell+\Delta\ell} - \ln W_\ell}{\Delta\ell}, \quad (2.12)$$

где  $W_\ell$ ,  $W_{\ell+\Delta\ell}$  - слой заиления на концах отрезков длиной  $\ell$  и  $\ell+\Delta\ell$ .

Преобразуем уравнение (2.11) через показатели  $W_\ell$  и  $W_{\ell+\Delta\ell}$  из уравнения (2.10).

Затем обе части полученного уравнения умножаем на  $\Delta\ell$  и потенцируем, имея ввиду, что

$$\Delta \ln W = \ln \frac{W_{\ell+\Delta\ell}}{W_\ell},$$

Приходим к выражению

$$\frac{W_{\ell+\Delta\ell}}{W_\ell} = e^{(\mu_1 W_H - N)\Delta\ell} + \frac{W}{W_{ст}} [1 - e^{(\mu_1 W_H - N)\Delta\ell}]$$

$$\text{Или } \varphi = \frac{W_{\ell+\Delta\ell} - W_\ell}{W_{\ell+\Delta\ell}} = [1 - e^{(\mu_1 W_H - N)\Delta\ell}] \cdot \left(1 - \frac{W}{W_{ст}}\right) \quad (2.13)$$

При постоянном значении  $\Delta\ell$  уравнение (12) линейно.

Если по ординате графика откладывать  $\varphi$ , а по абсциссе  $W_\ell$ , то прямая отсечет на оси ординат отрезок, равный  $1 - e^{(\mu_1 W_H - N)\Delta\ell}$ , а на оси абсцисс отрезок, равный  $W_{ст}$ . Зная длину отрезка  $\Delta\ell$  можно найти  $\mu_1 W_H - N$

$$\mu_1 W_H - N = \ln \frac{(1 - \varphi_m)}{\Delta \ell}, \quad (2.14)$$

где  $\varphi_m$  – длина отрезка, отсекаемого на оси ординат.

Для нахождения  $W_0$  нужно задаться сначала значением  $W_0$  близким к нулю, а затем, постепенно увеличивая его методом последовательных приближений, добиться на графике линейной зависимости

$$\varphi = \frac{W_{\ell+\Delta\ell} - W_\ell}{W_{\ell+\Delta\ell}} \text{ от } W_\ell. \quad (2.15)$$

Это значение  $W_0$  используется в расчетах по уравнению (2.10).

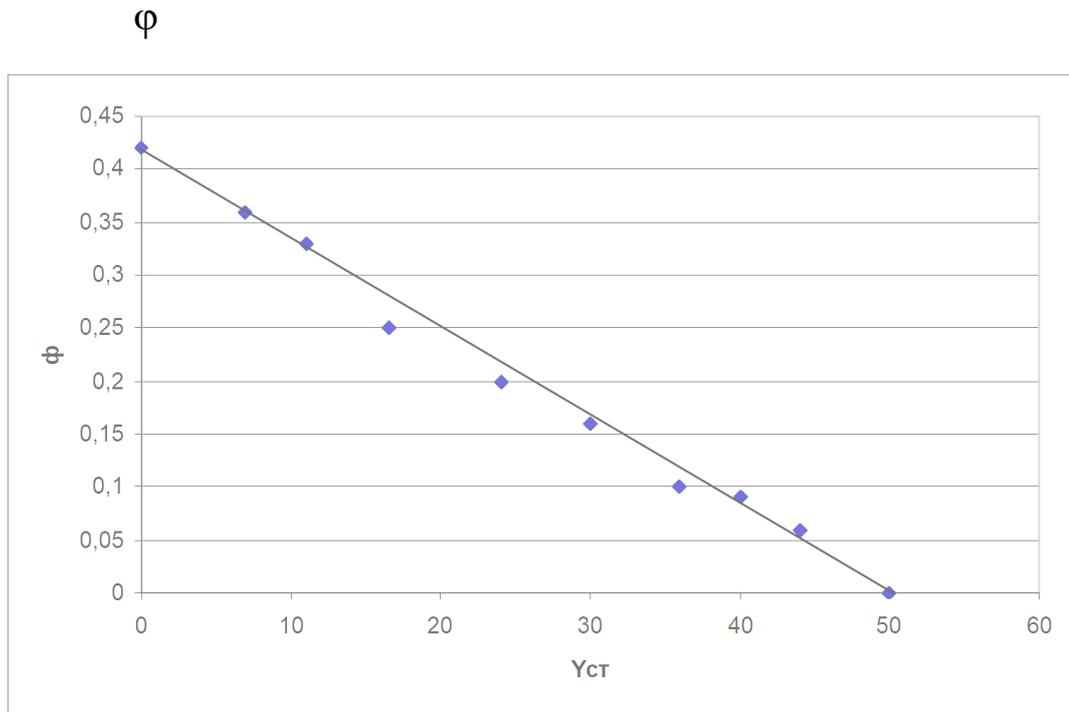
Предложенную выше модель можно использовать для определения изменения объёма заиления по длине отстойника на определенный момент времени, заменив параметр  $W$ (слой заиления) на  $Y$ (объем заиления)

$$Y = \frac{Y_{cm}}{1 + \frac{Y_{cm} - Y_0}{Y_0} e^{(\mu_1 W_H - N)\ell}} \quad (2.16)$$

### **Задача 2.1. Создать базу данных в виде таблицы и построить на миллиметровке плавную кривую**

Задачу выполняем используя выше изложенную методику, на основании экспериментальных данных (на примере заиления 1-й секции горизонтального отстойника, принимающего технологическую воду цементного предприятия, находящегося в г. Фокино Брянской области), определяем следующие параметры модели (см. рис.2.2.):

$$Y_0 = 7 \text{ м}^3, Y_{ct} = 50 \text{ м}^3, \varphi = 0,42, \mu_1 W_H - N = 0,15 \frac{1}{\text{м}}, Q = 0.2 \text{ м}^3/\text{с}.$$



W

Рис.2.2. График линейной зависимости  $W_{ст}$  от  $\phi$  отстойника  
в г. Фокино Брянской области.

W

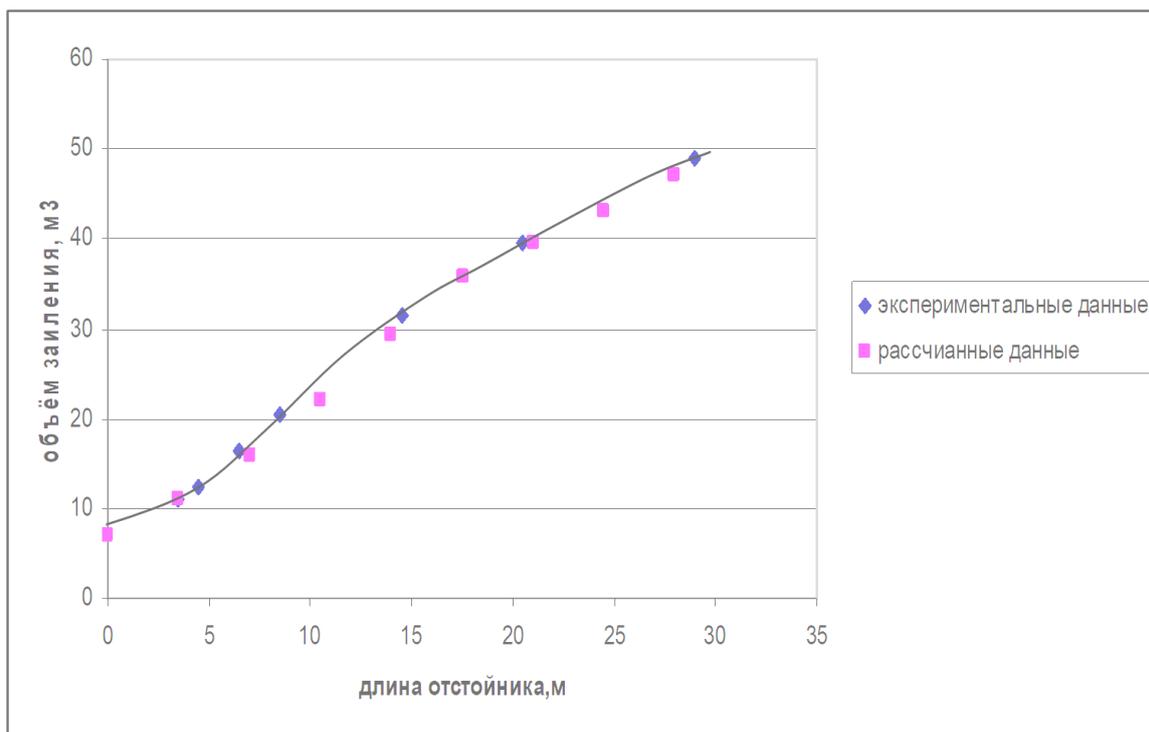


Рис. 2.3. График кривой, описывающей заиление отстойника (таблица 2.1)

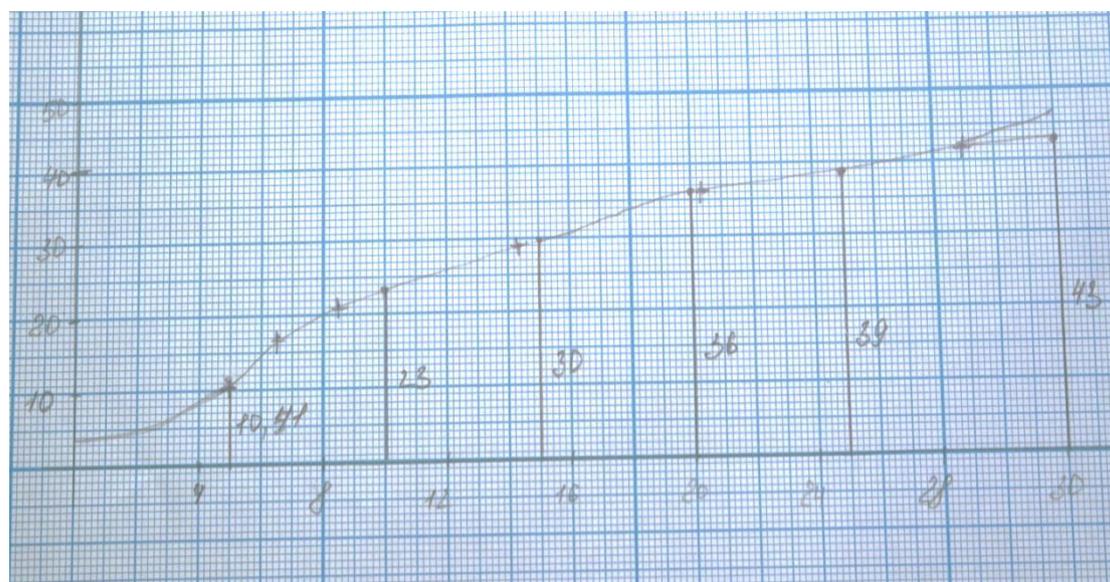
Таблица 2.1- Экспериментальные данные заиления отстойника в г. Фокино  
Брянской области

Вариант /№п/п	Расстояние от начала отстойника L, м						Объем заиления W, м <sup>3</sup>					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	4,8	4,9	5	5,1	5,2	5,3	10	10,3	10,41	10,5	10,7	10,8
2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	16	16,3	16,5	16,7	17,0	17,2
3	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	20	20,1	20,24	20,3	20,4	20,5
4	11,3	11,4	14,5	14,6	14,7	14,8	27	28	29	30	31	32
5	20,3	20,4	20,5	20,6	20,7	20,8	34	35	36	37	38	39
6	28,8	28,9	29	29,2	29,3	29,4	40	41	42	43	44	45

### Ход вычислений:

На миллиметровую бумагу наносим из таблицы 2.1. значения объемов заиления. Соединяем их и получаем график плавной кривой. Потом через одинаковые расстояния восстанавливаем перпендикуляры к кривой. Например, через 3,5 метра (рисунок 2.4).

W, м<sup>3</sup>



L, м

Рисунок 2.4. Экспериментальные данные заиления отстойника  
в г. Фокино Брянской области

**Задача 2.2. Выполнить дальнейшие действия для получения итоговых данных для модели**

Определяем объемы заилиenia по формуле  $\varphi = \frac{W_{\ell+\Delta\ell} - W_{\ell}}{W_{\ell+\Delta\ell}}$ , подписываем их

в точках перпендикуляров на кривых.

Наносим на графики (рисунки 2.4 и 2.5).

$\varphi$

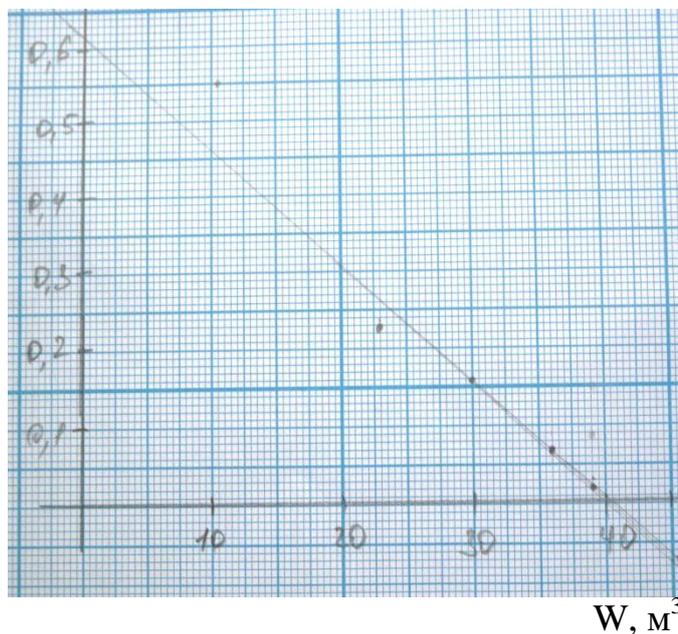
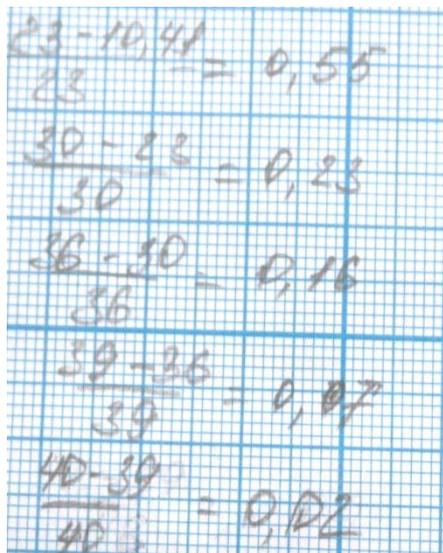


Рисунок 2.5. График объемов заилиenia

На миллиметровке проводим прямую линию по всем точкам. Если не получилось, начинаем расчет заново, делая кривую еще более плавной.

В случае получения прямой, на пересечениях с осями находим  $Y_{\text{ст}}$ ,  $\varphi$  при  $Y_0$ .

Далее находим  $\mu_1 W_H - N = \ln \frac{(1 - \varphi_m)}{\Delta\ell}$  скоростной коэффициент.

И подставляя в формулу  $W = \frac{W_{\text{cm}}}{1 + \frac{W_{\text{cm}} - W_0}{W_0} e^{(\mu_1 W_H - N)\ell}}$  найденные значения,

находим расчетные значения для графика (рис. 2.6).

Таблица 2.2 - Объем заиления

Расстояние от начала отстойника L, м							Объем заиления W, м <sup>3</sup>					
Вариант №п/п	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	4,8	4,9	3	5,1	5,2	5,3			10,41			
2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8			16,5			
3	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8			20,24			
4	11,3	11,4	14,5	14,6	14,7	14,8			29			
5	20,3	20,4	20,5	20,6	20,7	20,8			36			
6	28,8	28,9	29	29,2	29,3	29,4			42			

Экспериментальные данные и рассчитанные по уравнению (2.10) нанесены на график (см. рис. 2.3). Совпадение результатов расчета и экспериментальных данных дает основания сделать вывод, что данный метод можно применять для практического использования математической модели при прогнозировании заиления отстойников.

### **Задача 2.3. Нанести экспериментальные и расчетные данные на один график в программе Excel.**

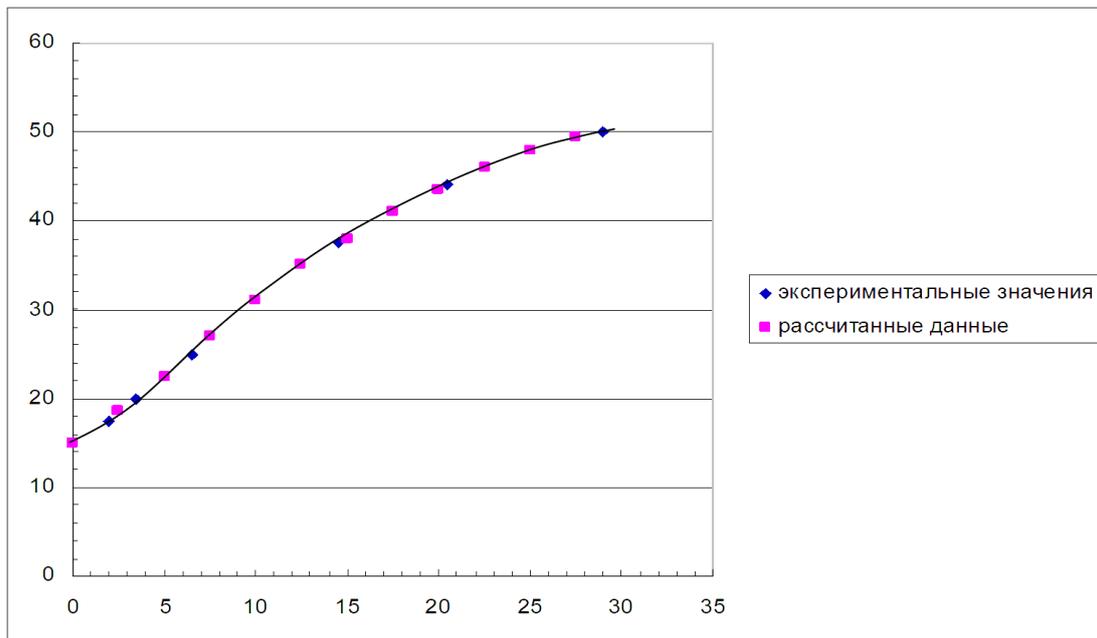
В ходе анализа результатов исследования ещё двух отстойников:

- две секции отстойника, принимающего технологическую воду цементного предприятия;

- первичный отстойник "Центральной станции аэрирования г. Брянска.

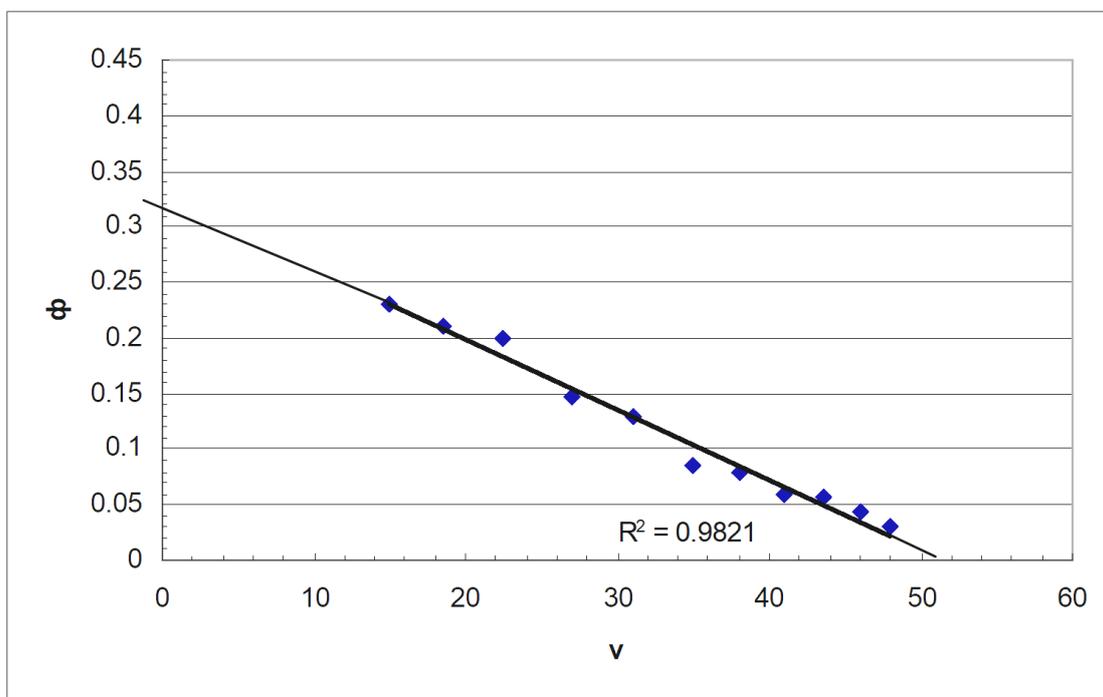
На рисунках 2.6 представлены экспериментально полученные значения объемов заиления данных отстойников по длине (а) и графики определения параметров моделей их заиления (б). При этом получили зависимость следующего характера: с уменьшением расхода воды – скоростной коэффициент увеличивается, варьируясь, причём, среднее значение  $\mu_1 W_{H-N} = 0,145 \frac{1}{м}$ .

Среднее значение  $Y_0$  равно 20% от  $Y_\infty$ .



а)

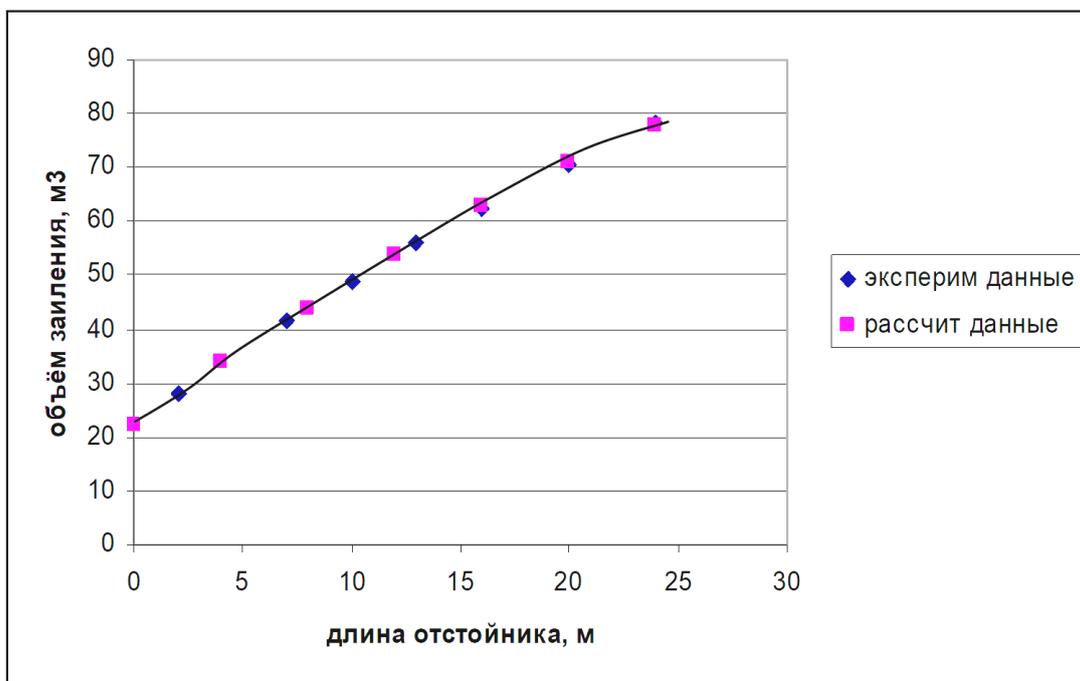
Рисунок 2.6. Вторая секция отстойника г.Фокино



б)

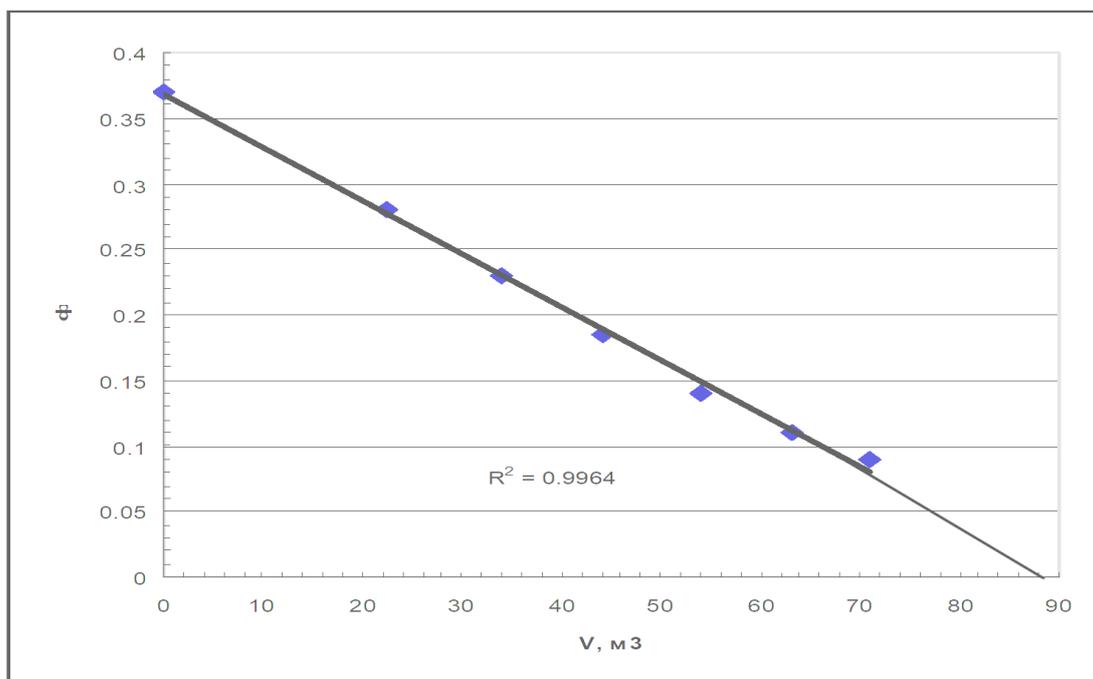
Рисунок 2.6. Вторая секция отстойника г.Фокино.

$$Y_0=15 \text{ м}^3, Y_\infty=51 \text{ м}^3, \mu_1 W_{H-N} = 0,17 \frac{1}{\text{м}}, Q=0.2 \text{ м}^3/\text{с}.$$



а)

Рисунок 2.7. График объемов заиления



б)

Рисунок 2.7. Отстойник очистных сооружений г. Брянска.

$$Y_0=22.3 \text{ м}^3, Y_\infty=88 \text{ м}^3, \mu_1 W_{H-N} = 0,115 \frac{1}{\text{м}}, Q=40 \text{ м}^3/\text{с}.$$

### Задание 3. Мелиоративные системы и охрана вод

#### 3.1. Определение площадей подтопления территории, прилегающей к водохранилищу

При строительстве водохранилища происходит затопление значительных площадей, иногда особенно ценных сельскохозяйственных и лесных земель. При этом выделяют зоны постоянного, временного затопления и зоны подтопления. Зоны подтопления образуются при подъеме уровня грунтовых вод (УГВ) после заполнения водохранилища. Подъем уровня грунтовых вод протекает очень медленно и связан с фильтрационными свойствами грунтов, режимом уровней водохранилища, притоком грунтовых вод извне, а так же атмосферных осадков, выпадающие на поверхность. Величина зоны подтопления может быть весьма значительной. Подъем УГВ вызывает переувлажнение, заболачивание, а в южных районах и засоление земель. Такие явления приводят к потере плодородия почв, снижению урожаев и вывода земель из оборота.

В зависимости от глубины грунтовых вод зона подтопления территории разделяется на переувлажненную и заболоченную зону. При этом УГВ изменяется в следующих пределах: для гумидной зоны:

- заболачивание  $УГВ < 0,5$  м;
- переувлажнение  $0,5 < УГВ < 1,0$ ;

для аридной зоны:

- заболачивание  $УГВ < 1,0$  м;
- переувлажнение  $1,0 < УГВ < 1,5$  м.

Разные значения зоны подтопления от изменения УГВ для гумидной и аридной зон связаны с тем, что в аридной зоне большее влияние оказывает засоление земель, чем заболачивание. Засоление почв происходит при глубине залегания грунтовых вод менее 2-3 м.

Задание заключается в определении отрицательного экологического влияние водохранилища на прилегающие земли при подъеме УГВ.

### Задача 3.1

Определить по формуле С.Ф. Аверьянова подъем УГВ после заполнения водохранилища. Определить зоны возможного заболачивания и переувлажнения.

Исходные данные:

Показатели: Водно-физические свойства грунтов территории, прилегающей к водохранилищу:	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
1.Грунт водоносного горизонта	супесь тяжелая	песок мелкий	глина	супесь	супесь пылеватая	суглинок
2.Глубина залегания водоупора $h_2, м$	10	11	12	13	14	15
3.Коэффициент фильтрации водоотдача $K_f, м/сут$	0,005	0,2	0,02	0,003	0,01	0,04
4.Водоотдача $m, м^3$	0,1	0,25	0,07	0,09	0,11	0,1
5.Глубина залегания грунтовых вод $h_1, м$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
6.Полная влагоемкость ПВ, %	14	7	30	28	10	18
7.Наименьшая влагоемкость НВ, %	12	8	27	23	7	16
8.Максимальная молекулярная влагоемкость - $W_0, %$	10	6	24	20	5	14
9.Оптимальная влагоемкость почвы $W, %$	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96
10.Длина береговой линии $L_B, м$	6500	7000	7500	8000	8500	9000

Пример расчета:

- грунт водоносного горизонта — супесь тяжелая;
- глубина залегания водоупора  $h_2, м$  - 17,5;
- коэффициент фильтрации  $K_f, м/сут$  - 0,06;
- водоотдача  $m, м^3$  - 0,15;
- глубина залегания грунтовых вод  $h_1, м$  - 1,7;
- полная влагоемкость ПВ, % объема - 33;
- наименьшая влагоемкость НВ, % объема - 12;
- максимальная молекулярная влагоемкость -  $W_0, %$  объема - 10;
- оптимальная влагоемкость почвы  $W, %$  объема - 0,9 НВ.

1. Расчет положения кривой депрессии (подъема УГВ) после создания водохранилища проводится по формуле С.Ф. Аверьянова для условий установившегося движения грунтовых вод отложным потоком

$$\Delta H = h \cdot \operatorname{erfc}(Z) \quad (3.1)$$

$$Z = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (3.2)$$

$$\alpha = \frac{K \cdot h_B}{\mu} \quad (3.3)$$

где  $\Delta H$  - повышение поверхности грунтовых вод на расстоянии  $x$  от уреза воды в водохранилище при НПУ, м;

$\alpha$ - уровне-проводность, м<sup>2</sup>/сут;

$h_B = h_1 - h_2$  - мощность водоносного горизонта, м;

$\mu$  - коэффициент водоотдачи (доли единицы);

$t = 100$  сут - расчетный период времени (может приниматься равным до 10 лет - время стабилизации уровня режима);

$\operatorname{erfc}(Z)$  - специальная функция (рис. 3.1, табл. 3.1), определяется по формуле

$$\operatorname{erfc}(Z) = \left[ \frac{e^{-Z^2}}{\sqrt{\pi Z}} \left[ 1 - \frac{1}{2Z^2} + \frac{1.3}{(2Z^2)^2} \right] \right] \quad (3.4)$$

Таблица 3.1 – Значение функции  $\operatorname{erfc}(Z)$

$Z$	$\operatorname{erfc}(Z)$	$Z$	$\operatorname{erfc}(Z)$
0,0	1,000	0,7	0,333
0,1	0,888	0,8	0,258
0,2	0,777	0,9	0,253
0,3	0,671	1,0	0,157
0,4	0,572	1,2	0,090
0,5	0,480	1,5	0,034
0,6	0,396	1,8	0,011
		2,0	0,004

Положение уровня грунтовых вод после создания водохранилища рассчитываем по уравнению

$$h = h_1 - \Delta H$$

$$\Delta H = h_1 - \text{erfc}(Z)$$

Расчет сводим в таблицу 3.2.

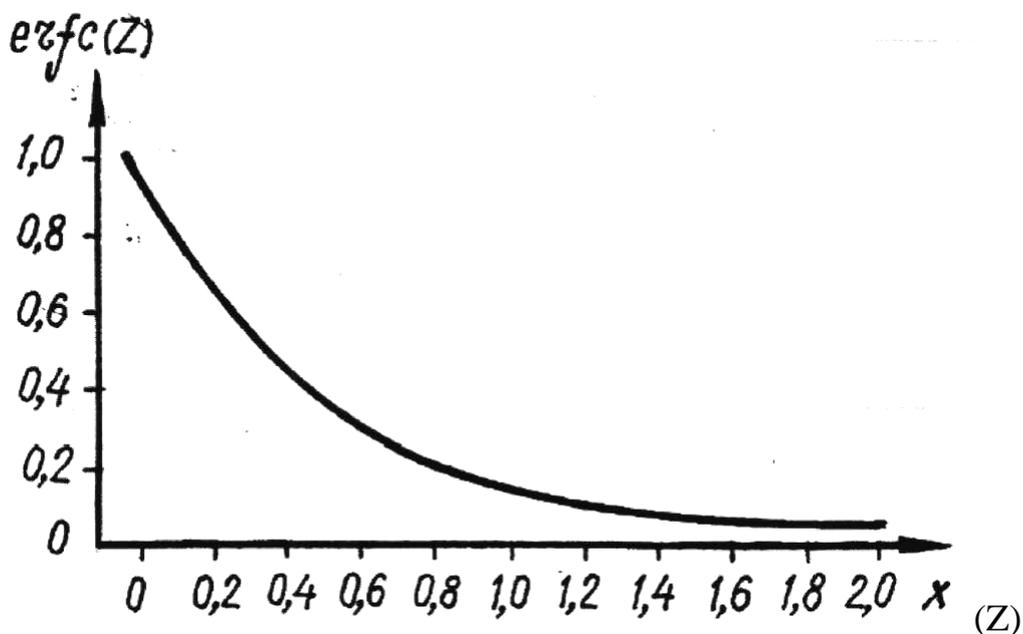


Рис. 3.1. График зависимости значений функции  $\text{erfc}(Z)$

Таблица 3.2- Расчет подъема УГВ

Расстояние от уреза воды $x$ , м	$h_2$	$h_1$	Мощность водоносного горизонта, $h_B = h_1 - h_2$ , м	Уровнепроводность, $a$ , м <sup>2</sup> /сут	$Z$	$\text{erfc}(Z)$	$\Delta H$ , м	Глубина залегания грунтовых вод, $h = h_1 - \Delta H$ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	17,5	1,7	15,8	6,32	0	1,0	1,7	0
10	17,5	1,7			0,2	0,777	1,32	0,38
25	17,5	1,7			0,5	0,482	0,816	0,88
50	17,5	1,7			1,0	0,157	0,267	1,43
75	17,5	1,7			1,5	0,034	0,0578	1,64
100	17,5	1,7			1,9	0,004	0,0008	1,69

Для определения зон заболачивания ( $x_3$ ) и переувлажнения ( $x_{пер}$ ) строится график (рис.3.2) зависимости значений  $H$  от  $x$ , используя данные графы 1 и 8 (табл.3.2). Пределы изменения УГВ рассматривают для аридной зоны (заболачивание - УГВ < 1,0 м; переувлажнение - 1,0 < УГВ < 1,5 м).

По плану определяют длину береговой линии по урезу воды при НПУ -  $L_B$ .

Зная ширину зоны влияния водохранилища -  $L_{угв}$  на подъем УГВ, определяют площадь подтопления  $F_n$  по формуле

$$F_n = L_B \cdot L_{угв} \cdot 10^{-4} \quad (3.5)$$

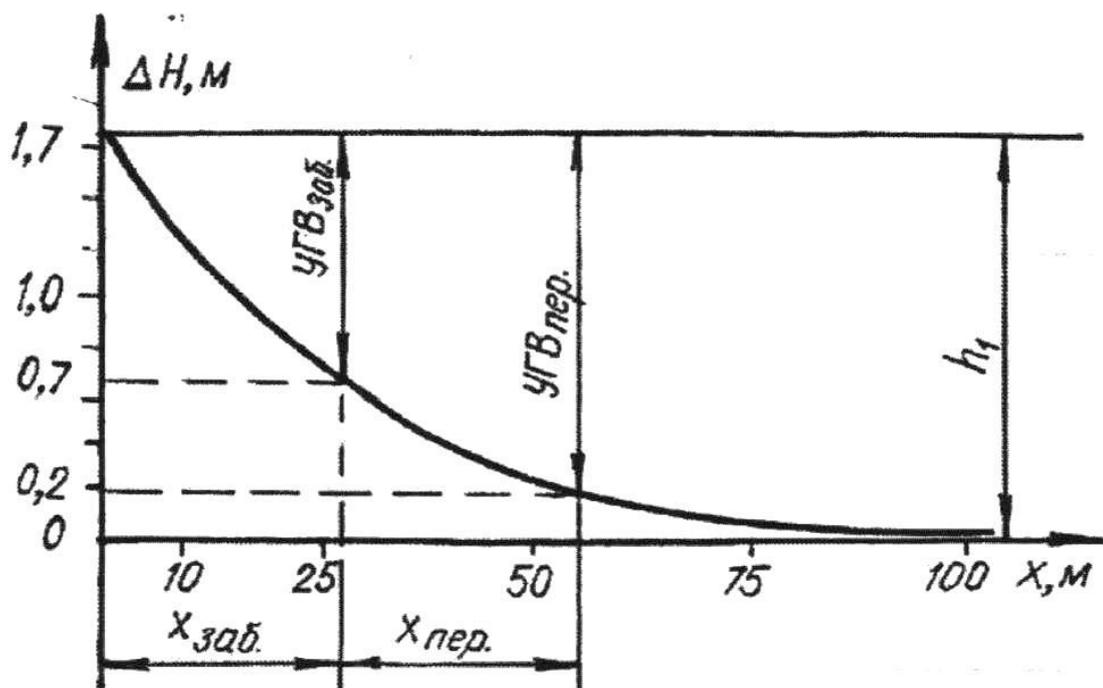


Рис. 3.2. График для определения длины зоны заболачивания и переувлажнения

Площадь заболачивания определяется по формуле

$$F_3 = L_B \cdot x_3 \cdot 10^{-4} \quad (3.6)$$

Площадь переувлажнения

$$F_{пер} = L_B \cdot x_{пер} \cdot 10^{-4} \quad (3.7)$$

Результаты расчетов показывают, что заболачивание территории возможно на расстоянии около 27 м от уреза воды.

Переувлажнение также составит зону шириной около 27 м.

Влияние водохранилища сказывается на расстоянии до 54 м.

Длина береговой линии равна 9000 м, ширина подтопления УГВ,  $L = 54$  м,

Площадь подтопления

$$F_n = 9000 \cdot 54 \cdot 103 = 486103 \text{ м}^2 = 48,6 \text{ га}$$

Площадь заболачивания и переувлажнения составит

$$F_{заб} = F_{пер} = 9000 \cdot 27 = 243 \cdot 10^3 \text{ м}^2 = 24,3 \text{ га}$$

Площадь затопления определяется с помощью палетки  $F_{зат} = 1200 \text{ га}$ .

Вывод. Затопление и подтопление площадей в районе водохранилища снижает продуктивность растений, нарушается рекреационная и экологическая обстановка.

Для выбора варианта природоохранных мероприятий необходимо определить ущерб от снижения продуктивности естественных сельскохозяйственных угодий при затоплении и подтоплении площадей.

#### Задание 4 Прогноз подъема уровня подземных вод на мелиоративных системах за счет техногенных факторов

Метод водного баланса применяется для простых случаев:

- отсутствие гидрогеологических границ вблизи массива;
- отсутствие перетекания в нижележащие слои и т.д.

Средняя скорость подъема уровня подземных вод определяется по формуле

$$v_n = \frac{q_t}{10000 \cdot t \cdot \mu}, \quad (4.1)$$

где  $q_t$  - приток воды, идущий на пополнение подземных вод за счет техногенных факторов

$$q_t = V_{v,a} + V_l - V_v, \quad (4.2)$$

где  $V_{v,a}$  - среднегодовая величина инфильтрационного питания, м<sup>3</sup>/га;

$V_l$  - фильтрационные потери из оросительной сети, м<sup>3</sup>/га;

$t$  - период времени, сут;

$\mu$  - недостаток насыщения зоны аэрации;

$V_v$  - вертикальный водо-обмен балансового слоя с нижележащими водоносными слоями (подпитывание подземных вод напорными подземными водами или перетекание подземных вод вниз).

Когда условия формирования режима подземных вод на проектируемой и эксплуатируемой мелиоративных системах носят сходный характер, при проектировании мелиоративных систем можно применять метод гидрогеологической аналогии. Результаты наблюдений за режимом подземных вод на эксплуатируемой системе используются для обоснования прогнозного режима подземных вод на проектируемой системе.

При выборе объектов-аналогов следует учитывать сходность природных условий, определяющих степень естественной дренированности, а также конструктивные особенности систем, технологические мелиоративные решения, положение искусственных гидрогеологических границ и формирование площадного инфильтрационного питания подземных вод.

Критерии для выбора объектов-аналогов даны в табл.4.1.

Таблица 4.1- Критерии для выбора объектов-аналогов

Наименование аналогов	Элементы мелиоративно-гидрогеологического районирования	Направленность сельхозпроизводства и технологические решения по мелиорации	Конструктивные особенности системы	Информационное обеспечение
1	2	3	4	5
Система-аналог	Морфологические типы I порядка (подпровинции, области)	Сходный состав сельскохозяйственных культур, севооборотов; тип мелиоративных мероприятий (орошение, промывки, мелиорация солонцов и др.)	Однотипные конструкции гидромелиоративных систем в целом (магистральный и межхозяйственные каналы, способы полива, оросительная норма, коэффициент полезного действия)	Исходное положение подземных вод, динамика уровня подземных вод (осредненная по системе скорость подъема, годовая амплитуда колебаний). Изменение режимобразующих факторов (КПД и осадки)
Участок-аналог	Морфогенетические типы II порядка (области, подобласти)	Сходный состав сельскохозяйственных культур, севооборотов, тип и вид мелиоративных мероприятий (орошение дождеванием, поверхностный полив, режим орошения, химмелиорация, комплексные мелиорации)	Однотипные конструктивные гидроэлементы мелиоративных систем (межхозяйственная и внутрхозяйственная сеть, способы полива, техника полива)	Исходное положение подземных вод. Режим подземных вод в зависимости от режимобразующих факторов. Структура водного баланса территории и изменение ее за период эксплуатации (КПД, фильтрационные потери, осадки, режим орошения)

При составлении прогнозов уровня подземных вод следует использовать Пособие к ВСН 33-2.1.05-85 "Гидрогеологические прогнозы".

Многолетний подъем уровня подземных вод в пределах территории определяется при известной величине инфильтрационного питания. При определении его не должны учитываться сезонные колебания уровня подземных вод и реальное размещение мелкой оросительной сети.

Моделирование прогноза подъема уровня подземных вод на ЭВМ следует выполнять на основе уравнений Буссинеска и его модификаций.

При движении влаги преимущественно вертикального характера без боковых растеканий, прогнозы изменения уровня подземных вод выполняются по одномерным моделям влагопереноса, где описано движение влаги в зонах неполного и полного водонасыщения с учетом их взаимодействия.

Данные для выполнения прогноза включают:

- параметры влагопереноса слоев профиля;
- исходная влажность на поверхности почвы;
- условие, моделирующее естественный ход осадков, испарения, поливов;
- на нижней границе ниже исходного уровня подземных вод результирующая оттоков и притоков.

Расчетом определяют на заданные интервалы времени значения уровня подземных вод, эпюры влажности в зоне аэрации, потоков воды в каждом сечении профиля, возможность образования верховодки

Водоносный горизонт (верховодка) образуется в тех случаях, когда интенсивность инфильтрационного питания превышает коэффициент фильтрации этого слоя  $g > k_p$ .

Подпор на любой момент времени определяется по формуле

$$\Delta H = \frac{h_p (g - g_e)}{k_p} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{k_p t}{\mu h_p} \right) \right], \text{ м} \quad (4.3)$$

где  $k_p$ ;  $h_p$  - соответственно коэффициент фильтрации и мощность разделяющего слоя, м/сут, м;

$t$  - продолжительность стояния уровня верховодки, сут;

$\mu$  - коэффициент недостатка насыщения грунта зоны аэрации;

$\xi$  - интенсивность инфильтрационного питания подземных вод при орошении, м/сут;

$\xi_e$  - интенсивность инфильтрационного питания подземных вод в естественных условиях, м/сут.

Образование верховодки необходимо прогнозировать для критических периодов года (снеготаяние, промывка, период поливов и т.д.).

Продолжительность стояния уровня верховодки определяется по формуле

$$t = \frac{\mu h_p}{k_p} \ln \frac{\Delta H + h_p}{h_p}, \text{ сут.} \quad (4.4)$$

где  $\Delta H$  - подпор, м.

Если продолжительность стояния уровня верховодки превышает число дней с инфильтрационным питанием, то выполняется прогноз подъема верховодки до критической глубины.

**Задача 4.1. Определить среднегодовую скорость и время подъема уровня подземных вод до допустимой глубины для Явкинской оросительной системы Николаевской области.**

Дано: Оросительная система расположена в междуречье Ингул-Ингулец.

Почвы - черноземы южные, незасоленные. До орошения грунтовые воды залежали на глубине 7,5 м, их минерализация 9 г/л, тип - сульфатный магниевонатриевый.

Статьи водного баланса по фактическим годам приведены в табл.4.3.

Таблица 4.2 - Исходные данные по вариантам

Вариант	$\eta$	$J_{нт, n}$	$V_v =$	$\mu =$	$V_{v, a} =$	Допустимая глубина, м
1	0,99	3600	155	0,15	1140	2,0
2	0,98	3500	153	0,17	1107	2,0
3	0,97	3550	150	0,15	1098	2,0
4	0,96	3440	161	0,16	1089	2,0
5	0,98	3670	165	0,15	1500	2,0
6	0,96	3550	160	0,16	1110	2,0

Таблица 4.3- Статьи водного баланса по фактическим годам

Год	Осадки – поверхностный сток, м <sup>3</sup> /га	Испарение суммарное, м <sup>3</sup> /га	Оросительная норма, м <sup>3</sup> /га	Годовая величина инфильтрационного питания (результатирующая), м <sup>3</sup> /га
1962	3950	6399	5100	+2651
1963	2800	6659	3000	-859
1964	3430	5740	3500	+1190
1965	4485	6305	3000	+1180
1966	3971	5463	2850	+1358
1967	3453	5964	3750	+1139
1968	3760	6896	4500	+1364
				+8023

Расчет проводим по методу водного баланса.

Среднегодовая величина инфильтрационного питания составляет,

$$V_{va} = 1147 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Фильтрационные потери из оросительной сети при  $\eta = 0,98$  определяются приближенно по выражению

$$V_g = \frac{1-\eta}{\eta} J_{нт, n} = \frac{1-0,98}{0,98} \cdot 3500 = 71 \text{ м}^3/\text{га},$$

где  $\eta$  - коэффициент полезного действия внутрхозяйственной оросительной сети;

$J_{нт, n}$  - оросительная норма с учетом промывного режима.

Среднегодовое значение величины оросительной нормы составит

$$J_{\text{н.г.}} = 3500 \text{ м}^3/\text{га.}$$

Переток в нижний слой по данным гидрогеологических изысканий составит  $V_v = 160 \text{ м}^3/\text{га.}$

Среднее значение недостатка насыщения зоны аэрации в интервале 2 ÷ 7,5 м составит  $\mu = 0,16.$

Среднюю скорость подъема уровня подземных вод определяем по формуле:

$$v_n = \frac{V_{v.a} + V_a - V_v}{10000 \cdot \mu}$$

$$v_n = \frac{1147 + 71 - 160}{10000 \cdot 0,16} = 0,65 \text{ м/год.}$$

При средней скорости подъема уровня подземных вод, равной 0,65 м/год, подземные воды достигнут допустимой глубины 2 метра за восемь лет.

**Задача 4.2. Рассчитать возможность образования водоносного горизонта (верховодки) на слабопроницаемом слое для Комсомольской оросительной системы Саратовской области.**

Дано: Комсомольская оросительная система располагается в пределах террасированных долин р.Волги и Б.Иргиза, а в гидрогеологическом отношении находится в пределах Большеиргизского гидрогеологического района Прикаспийского артезианского бассейна.

Изменение интенсивности инфильтрационного питания за вегетационный период составляет 0,00053 м/сут.

Продолжительность вегетационного периода 210 сут.

Коэффициент недостатка насыщения грунта зоны аэрации  $\mu = 0,1.$

Геолого-литологический разрез представлен тремя слоями:

первый слой:  $h_1 = 7,5$  м,  $k_1 = 0,2$  м/сут,  $T_1 = 1,58$  м<sup>2</sup>/сут;

второй слой, разделяющий:  $h_p = 5$  м,  $k_p = 0,001$  м/сут;

третий слой:  $h_3 = 20$  м,  $k_3 = 11,5$  м/сут,  $T_3 = 230$  м<sup>2</sup>/сут.

При схематизации литологического разреза получаем трехслойную фильтрационную схему с разделяющим вторым слоем ( $\beta_2 < 2 \cdot 10^{-2}$ ).

При проведении поливов на разделяющем слое возможно формирование верховодки.

Определим возможную величину подпора за период  $t = 210$  сут. по формуле 4.3

$$\Delta H = \frac{5 \cdot 0,00053}{0,001} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{0,001 \cdot 210}{0,1 \cdot 5} \right) \right] = 0,68 \text{ м.}$$

Продолжительность стояния уровня верховодки рассчитываем по формуле 4.4

$$t = \frac{0,1 \cdot 5}{0,001} \ln \frac{0,68 + 5}{5} = 89,3 \text{ сут.}$$

За не вегетационный период (155 сут.) верховодка полностью профильтруется через разделяющий слой, подземные воды на выделенном слабоводопроницаемом слое подниматься не будут и дренаж не потребуется.

## Задание 5. Водная миграция

Гидросфера Земли на 94,1% или 1370 млн.км<sup>3</sup> представлена солеными водами океанов и морей. Объем всех вод суши (включая ледники и подземные воды до глубины 5 км, озера и реки, вода в почве) составляет менее 90 млн км<sup>3</sup>.

Поверхность Мирового океана, занимающего около 71% земной поверхности, расположена между атмосферой и литосферой. Вода каждой из этих составляющих имеют свой средний химический состав. Весь этот природный водный комплекс находится в состоянии непрерывного движения и обновления. Гидросфера, так как и земная кора насыщена химическими элементами, представленными разнообразными формами нахождения. Наиболее характерны для гидросферы формы – простые и сложные ионы, а также молекулы, находящиеся в состоянии сильно разбавленных растворов. Весьма распространены ионы, сорбционно связанные с частицами коллоидных и субколлоидных размеров, находящиеся в морской воде в виде тонкой взвеси. Третью группу форм составляют элементы, входящие в состав мертвого и живого органического вещества. Элементы могут переходить из одной формы нахождения в другую. Например, ион, находящийся в растворе, может быть сорбирован частицей взвеси и в дальнейшем разделяет судьбу взвешенных частиц и не подчиняется законам растворов.

воды континентов и воды Мирового океана.

Воды континентов и воды Мирового океана особенно сильно минерализованы (соленые), и сильно отличаются по ионному и микро-компонентному составу, формам нахождения элементов.

В среднем соленость вод Мирового океана равна 35500 мг/л или 33-35 промилле. Нетрудно подсчитать, сколько всего растворенных солей в Мировом океане. Так как в каждом литре содержится в среднем 35 г солей, то во всем объеме океанических вод будет примерно  $48 \cdot 10^{12}$  т солей. Минерализация грунтовых вод примерно равна 431 мг/л (0,4 промилле), речных вод – 0,08 – 0,1 промилле.

В морских водах по сравнению с подземными и речными водами континентов (кроме рассолов) содержится в 200-400 раз больше хлора, брома, натрия, в 30-100 раз – калия, бора, магния, в 10 раз – лития (таблица 5.1).

По сравнению с морскими и океаническими в речных водах в десятки раз больше менее подвижных элементов, поступающих в воды при выветривании пород и почвообразовании – хрома, кремния, цинка, меди и др. элементов.

Наибольшее изменение химического состава вод континентов происходит в прибрежных зонах океана, дельтах и эстуариях рек, где преобладают взвешенные формы нахождения элементов.

Таблица 5.1 – Содержание растворимых форм химических элементов в гидросфере (по Лисицину А.П. (1978), Турекиану К.Н. (1969))

Элементы	Средняя концентрация, мкг/л	
	в Мировом океане	в речных водах
Cl	19353000	6400
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2701000	12000
S	890000	3960
Na <sup>+</sup>	10764000	4500
Mg <sup>2+</sup>	1297000	3300
Ca <sup>2+</sup>	408000	13000
K <sup>+</sup>	387000	1500
Br	67300	20
Sr	8100	80
SiO <sub>2</sub>	6200	13400
Si	3000	5700
F	1300	670
N	500	270
P	88	20
J	64	3
Ba	21	25
Mo	10	0.9
Zn	5	20
Fe	3.4	670
U	3.3	0.3
As	2.6	2
Al	1	75
Ti	1	4
Cu	0.9	7
Ni	0.5	2.5
Mn	0.4	10

В океане доминируют растворенные формы элементов. Концентрации всех элементов в океанической взвеси в десятки и сотни раз ниже, чем в речной взвеси за счет резкого сокращения доли силикатных форм, в том числе и таких слабых мигрантов как алюминий.

Непрерывная миграция веществ в системе континенты – океан происходит: на поверхности; в водосборных бассейнах разного порядка; из автономных ландшафтов в подчиненные. Одним из основных факторов, влияющих на дифференциацию вещества, в этих системах является водная миграция химических элементов и соединений, осуществляющаяся в виде разнообразных растворимых, коллоидных, взвешенных и других форм нахождения. Интенсивность этой миграции зависит как от внешних, так и внутренних факторов.

А.И. Перельман в 1956 году предложил для этой цели использовать коэффициент водной миграции:

$$K_x = (m_x \cdot 100 \%) / (a_x \cdot n_x)$$

где  $m_x$  – содержание  $x$  элемента в воде рек, ручьев и др. (мг/л или %);

$a_x$  – минерализация, мг/л;

$n_x$  – содержание  $x$  элемента в горной породе (%).

Чем  $K_x > 1$ , тем сильнее элемент выщелачивается из горных пород и почв, и тем интенсивнее его водная миграция.

Задача 5.1 Рассчитать коэффициенты водной миграции для кремния и цинка

Таблица 5.1 – Исходные данные по вариантам

№ варианта	$m_{Zn}$ , г/л	$m_{Si}$ , г/л	$n_{Zn}$ , %	$n_{Si}$ , %	$a_x$ , г/л
1	$1 \cdot 10^{-5}$	$10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	26,5	0,35
2	2	$10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	27,0	0,40
3	3	$10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	26,5	0,45
4	4	$10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	28,5	0,50
5	5	$10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	30,0	0,55
6	6	$10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	33,0	0,60

Пример расчета:

Допустим, что в воде реки содержится: кремния  $m_{Si} = 10^{-2}$  г/л, цинка  $m_{Zn} = 5 \cdot 10^{-5}$  г/л. Содержание цинка в горной породе дренируемой этой рекой  $n_{Zn} = 8,3 \cdot 10^{-3}$  %, а кремния  $n_{Si} = 29,5$  %. Минерализация  $a_x = 0,5$  г/л.

Рассчитаем коэффициенты водной миграции для кремния и цинка по вышеприведенной формуле. В итоге получаем  $K_{Zn} = 1,2$ ;  $K_{Si} = 0,07$ .

Вывод: цинк мигрирует в 17 раз интенсивнее кремния, хотя кремния в воде больше, чем цинка.

Коэффициент водной миграции различных элементов изменяется от сотых долей единицы до десятков и сотен, что позволило Б.Б. Полюнову и А.И. Перельману все химические элементы по коэффициенту водной миграции разделить на 4 группы:

1. *очень сильной миграции* (от 10 до 100 и более): Cl, N, S, J, Br, Ag, Sb, Hb, Se, Cd.

2. *сильной миграции* (от 1 до 10): As, B, Mo, Ca, Zn, Sr, Cu, Mg, Na, Sn, F.

3. *средней миграции* (от 0,1 до 1): U, P, Ni, Li, Pb, K, Co, Ba, Cr, Y, Si, Fe, Mn, V.

4. *слабой и очень слабой* (от 0,01 и менее и до 0,1): Al, Th, Ga, Ti, Sc.

Представленные выше данные относятся исключительно к элементам, находящимся в растворенном состоянии. При этом значительно больше их количества переносится не в растворе, а вместе с взвешенными в воде механическими частицами. Относительное содержание химических элементов в речных взвесах не соответствует кларкам земной коры. Это значит, что взвешенное вещество рек – не механический измельченный материал земной коры, а результат его определенного преобразования.

## Задание 6

### Расчёт разбавления сточных вод в водотоке

Многие водо-потребители, т.е. отрасли которые берут воду из водоемов, используют её безвозвратно. При этом 70...80% потребленной воды превращаются сточные воды, сбрасываемые в близлежащие водные объекты. Основными водопотребителями являются сельское и коммунальное хозяйства, а в промышленности - химическая и металлургическая, при этом вода используется в технологических и вспомогательных процессах или входит в состав выпускаемой продукции.

В соответствии с требованиями законодательства сточные воды можно сбрасывать в водные объекты при условии не допущения, ухудшения состояния окружающего водного бассейна.

Существуют два основных пути очистки сточных вод - разбавление сточных вод и очистка их от загрязнений.

Консервативными веществами называются вещества, концентрация которых изменяется в воде водного объекта только путем разбавления.

Неконсервативными веществами называются вещества, концентрация которых изменяется как под действием разбавления, так и вследствие протекания различных химических, физико-химических и биологических процессов.

Обезвреживание водного объекта происходит при совокупности разбавления и самоочищения. Сбросу сточных вод в водоем должен предшествовать расчет определения их объема, соответствующего нормативам.

Наибольшее распространение при расчёте разбавления сточных вод в водотоке получил метод Фролова – Родзиллера. В соответствии с этим методом определяется коэффициент смешения, который находят по формуле

$$e = \frac{1 - e^{-\alpha^3 L}}{1 + (Q/q)e^{-\alpha^3 L}} \quad (6.1)$$

где  $Q$  – среднемесячный расход воды водотока 95%-й обеспеченности, м<sup>3</sup>/с;

$q$  – максимальный расход сточных вод, подлежащих сбросу в водоток, м<sup>3</sup>/с;

$L$  – расстояние по фарватеру водотока от места выпуска до расчетного створа, м;

$\alpha$  – коэффициент, зависящий от гидравлических условий смешения.

Он рассчитывается по формуле

$$\alpha = \xi \cdot \varphi \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{q}} \quad (6.2)$$

где  $\xi$  – коэффициент, зависящий от расположения выпуска сточных вод в водоток: при выпуске у берега  $\xi = 1$ , при выпуске в фарватер  $\xi = 1,5$ ;

$\varphi$  – коэффициент извилистости водотока, т. е. отношение расстояния между рассматриваемыми створами водотока по фарватеру к расстоянию по прямой;

$D$  – коэффициент турбулентной диффузии.

Для упрощенных расчетов коэффициент турбулентной диффузии находят по формуле

$$D = \frac{V_{cp} \cdot H_{cp}}{200} \quad (6.3)$$

где  $V_{cp}$  – средняя скорость течения водотока на интересующем нас участке между нулевым и расчетным створами, м/с;

$H_{cp}$  – средняя глубина на этом участке, м.

Для детальных расчетов  $D$  определяется по формуле

$$D = \frac{q \cdot H_{cp} \cdot V_{cp}}{V = MC} \quad (6.4)$$

где  $H_{cp}$  – средняя глубина на рассматриваемом участке, м;

$V_{cp}$  – средняя скорость течения водотока на участке, м/с;

$q$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$C$  – коэффициент Шези, м<sup>1</sup>/с<sup>2</sup>;

$M$  – коэффициент, зависящий от  $C$ .

При условии:  $10 < C < 60 M = 0,7C + 6$ , при  $C \geq 60 M = 48 = \text{const}$ .

Произведение  $MC$  имеет размерность м/с<sup>2</sup>.

При переменных гидравлических условиях на отдельных участках распространения сточных вод до расчетного створа коэффициент турбулентной диффузии определяется для каждого участка по выражению (6.2), а затем для всей расчетной длины по соотношению

$$D = \frac{D_1 L_1 + D_2 L_2 + \dots + D_n L_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n} \quad (6.5)$$

где  $D_1, D_2, \dots, D_n$  – коэффициенты турбулентной диффузии отдельных участков,  $L_1, L_2, \dots, L_n$  – протяженность отдельных участков.

Распространение растворенных и взвешенных веществ в естественных потоках вычисляются уравнениями

$$\frac{dc}{dt} = D \cdot \left( \frac{d^2 c}{dx^2} + \frac{d^2 c}{dy^2} + \frac{d^2 c}{dz^2} \right) - U_z \frac{dc}{dz} \quad (6.6)$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{dc}{dt} + V_x \frac{dc}{dx} + V_y \frac{dc}{dy} + V_z \frac{dc}{dz} \quad (6.7)$$

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества в воде, мг/л;

$t$  – время, с;

$U$  – гидравлическая крупность взвешенных веществ, м/с (для растворенных веществ  $U = 0$  и уравнение записывается без последнего члена);

$V_x, V_y, V_z$  – компоненты скорости течения (м/с) относительно координат  $x, y, z$  (м).

Ось  $x$  направлена по течению потока, ось  $y$  – от поверхности ко дну, ось  $z$  – по ширине потока.

$D$  – коэффициент турбулентной диффузии ( $m^2/c$ ).

При распространении загрязнения в воде в одной какой-либо плоскости уравнение (6.6) может быть упрощено.

Если в горизонтальной плоскости, тогда уравнение запишется в виде уравнения

$$V_x = \frac{dc}{dx} = D \frac{d^2c}{dz^2} \quad (6.8)$$

Такая ситуация возникает, в частности, в том случае, когда по вертикальной оси перемешивание загрязняющих веществ с водой происходит очень быстро и поперечные течения отсутствуют. Необходимо проследить распространение загрязняющих веществ по ширине потока на различных расстояниях от места сброса сточных вод.

Расчет основывается на принципе сохранения вещества, учитывающие, что перенос загрязняющего вещества через поверхность, ограничивающую поток жидкости, равен нулю, т. е. для береговой черты потока граничные условия запишутся в виде

$$D \frac{dc}{dz} = 0 \quad (6.9)$$

Поскольку коэффициент  $D$  не может равняться нулю ( $D \neq 0$ ), то выражение (9) приобретает вид

$$\frac{dc}{dz} = 0 \quad (6.10)$$

Начальные условия могут задаваться либо в виде распределения концентрации загрязняющего вещества на начальном поперечнике, либо в виде расхода и концентрации поступающего в водный объект загрязняющего вещества с указанием места его поступления.

Уравнение (6.8) можно записать в форме конечных разностей. Содержащиеся в нем дифференциалы  $dc$ ,  $dx$ ,  $dz$  заменяются конечными приращениями  $\Delta C$ ,  $\Delta X$ ,  $\Delta Z$ . Уравнение (6.8) приобретает вид:

$$\frac{\Delta X C}{\Delta X} = \frac{D_{cp}}{V_{cp}} \cdot \frac{\Delta^2 Z}{\Delta Z^2} \quad (6.11)$$

Для расчета турбулентной диффузии всю расчетную область потока делим плоскостями, параллельными координатным, на расчетные клетки – элементы. По оси  $X$  таких элементов  $k$ , по оси  $Z$  –  $m$ . Каждому элементу присваивается свой индекс по соответствующим осям координат.

Изменение индекса на единицу показывает переход от одного элемента к соседнему. Значениям концентрации в каждом элементе присваиваются те же индексы (рис. 6.1).

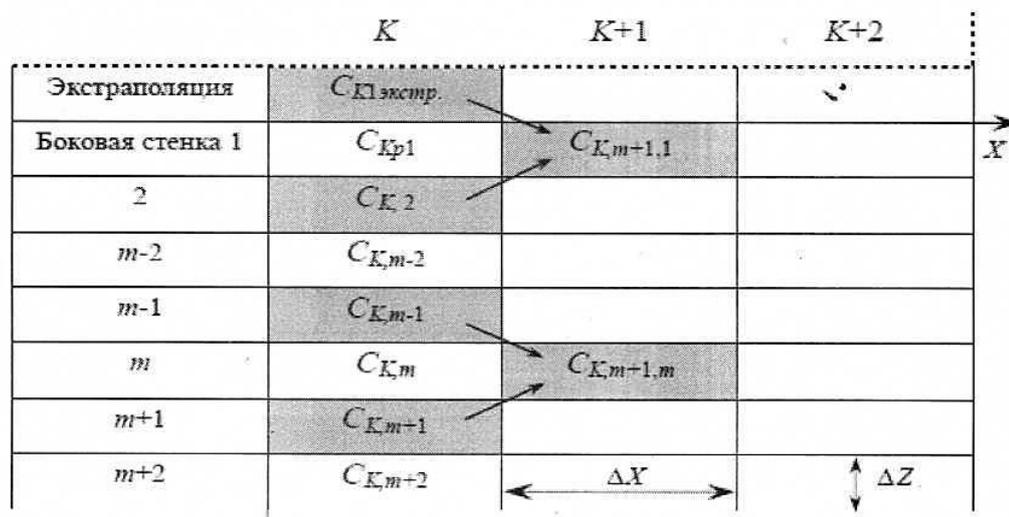


Рис 2. Сетка к расчету турбулентной диффузии для условий плоской задачи

Распространение концентрации загрязняющего вещества по длине и ширине потока, т. е. для условий плоской задачи, определяется с помощью уравнения

$$C_{k+1,m} = 0.5(C_{k-1,m} + C_{k,m+1}) \quad (6.12)$$

Значения  $\Delta X$  и  $\Delta Z$  связаны зависимостью

$$\Delta X = \frac{V_{cp} \cdot \Delta Z^2}{2 \cdot D} \quad (6.13)$$

Коэффициент турбулентной диффузии определяется по формуле (6.4).

Когда загрязняющее вещество достигнет граничных поверхностей потока, для расчета диффузии необходимо учитывать особые условия у стенок, уравнение (6.10), которое в конечных разностях запишется как

$$\left( \frac{\Delta C}{\Delta Z} \right)_{\text{граничная поверхность}} = 0 \quad (6.14)$$

Поле концентраций и расчетную сетку можно условно распространить и за пределы потока (за стенку), т. е. экстра-полировать концентрацию за ограничивающую водный поток поверхность.

При этом экстра-поляционное значение концентрации  $C_{k, \text{экстр}}$  в элементе, примыкающем к внешней поверхности стенки, и значение концентрации  $C_{k,1}$  в элементе, находящемся в потоке и примыкающем к внутренней поверхности стенки, должны удовлетворять условию (6.14), что возможно только когда соблюдается равенство

$$C_{k, \text{экстр}} = C_{k,1} \quad (6.15)$$

Формула (6.15) определяет правило экстраполяции концентрации загрязняющего вещества. Экстра-поляционные значения концентрации при определении диффузии используют как действительные. Расчет состоит в том, что на топографическом плане водного объекта обозначают место поступления сточных вод в водный объект (начальный створ). Ниже по течению поток схематизируется и делится на расчетные элементы. Скорость поступления сточных вод в водный объект в месте сброса  $V_{\text{ст}}$  приравнивается к скорости течения водотока  $V_{\text{ср}}$ . Условная площадь поперечного сечения притока  $\delta$  в месте его впадения определяется по формуле

$$\delta = \frac{q_{cp}}{V_{cp}} \quad (6.16)$$

Определение ширины загрязненной струи потока  $b$  в нулевом створе производят по формуле .

$$b = \frac{\delta}{H_{cp}} = \frac{q_{cn}}{H_{cp} \cdot V_{cp}} \quad (6.17)$$

В соответствии с величиной  $b$  назначается ширина расчетного элемента  $\Delta Z$ . Наиболее допустимая величина  $\Delta Z$  при береговом сбросе сточных вод находится из соотношения

$$b = \frac{\delta}{H_{cp}} = \frac{q_{cn}}{H_{cp} \cdot V_{cp}}$$

При выпуске сточных вод на некотором расстоянии от берега или в фарватере величина  $\Delta Z$  вычисляется из соотношения

$$\Delta Z = \frac{\delta}{2} = \frac{q_{cn}}{2H_{cp} \cdot V_{cp}} \quad (6.18)$$

Необходимо соблюдать условие, при котором при назначении величины  $\Delta Z$  выполнялось бы неравенство

$$\Delta Z \leq \frac{1}{10} B \quad (6.19)$$

где  $B$  – ширина водотока.

Таким образом, при расчете турбулентной диффузии весь участок потока (от нулевого створа до расчетного или створа, который нас интересует по условиям решаемой задачи) делят на клетки со сторонами  $\Delta X$  и  $\Delta Z$ , получая расчетную сетку.

Клетки табсечения водотока со сточными водами в начальном поперечнике (нулевой створ), табзаполняются числами, выражающими концентрацию загрязняющего вещества в сточной воде. Остальные клетки заполняются числами, отражающими естественную концентрацию загрязняющего вещества в водотоке (в частном случае это может быть нулевая концентрация).

Если размеры клеток малы, а протяженность интересующего участка водотока велика, то расчет ведут до определенного створа, после чего клетки в сечении объединяют (укрупняют), получая новые средние значения концентрации загрязняющего вещества и новые линейные параметры клетки.

Значения концентраций загрязняющего вещества получают как среднее арифметическое из суммы концентраций объединенных клеток. Укрупнение клеток можно повторять несколько раз, начиная с определенного раствора.

### Задача 6.1

Определить максимальную концентрацию загрязняющего вещества в водотоке на расстоянии 500 м от места выпуска сточных вод по схеме плоской задачи (табл. 6.1). Выпуск сточных вод – береговой.

Таблица 6.1 – Исходные данные по вариантам

№ варианта	$q_{cm}, \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{cp}, \text{ м/с}$	$H_{cp}, \text{ м}$	$B, \text{ м}^2/\text{с}$	$D, \text{ м}^2/\text{с}$	$C, \text{ г/м}^3$	$C_{cm}, \text{ г/м}^3$
1	25,3	2,44	2,1	16	0,073	0	100
2	24,4	2,44	2,1	16	0,073	0	100
3	31,0	2,44	2,1	16	0,073	0	100
4	29,0	2,15	2,1	16	0,073	0	100
5	21,6	2,15	1,75	16	0,073	0	100
6	25,4	2,15	1,75	20	0,073	10	100

**Пример расчета:** Определить максимальную концентрацию загрязняющего вещества в водотоке на расстоянии 700 м от места выпуска сточных вод по схеме плоской задачи. Выпуск сточных вод – береговой.

Расход сточных вод  $q_{cT} = 31 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Водоток характеризуется следующими показателями:

- средняя скорость течения  $V_{cp} = 2,42$  м/с;
- средняя глубина водотока  $H_{cp} = 2,37$  м;
- ширина водотока  $B = 26,5$  м.

Коэффициент турбулентной диффузии  $D = 0,073$  м<sup>2</sup>/с.

Для упрощения расчетов примем, что фоновое загрязнение водотока отсутствует, т. е.  $C_b = 0$ , а концентрация загрязняющего вещества в сточной воде  $C_{ст} = 100$  г/м<sup>3</sup>.

Решение:

Определим начальное сечение струи

$$\delta = \frac{q_{ст}}{V_{cp}} = \frac{31}{2,44} = 12,7 \text{ м}$$

Определим ширину загрязненной части водотока

$$b = \frac{\delta}{H_{cp}} = \frac{12,7}{2,1} = 6,05 \text{ м}$$

Выбираем ширину расчетной клетки, соблюдая условие м.

$$\Delta Z = 1,3 \text{ м}$$

В этом случае число клеток по ширине потока, занятых загрязненной водой в результате выпуска сточных вод:

$$n = \frac{b}{\Delta Z} = \frac{6,05}{1,3} = 5$$

Общее число клеток по ширине водотока:

$$n = \frac{b}{\Delta Z} = \frac{16}{1,3} = 12$$

Определить расстояние между расчетными сечениями вдоль водотока

$$\Delta X = \frac{V_{cp} \cdot \Delta Z^2}{2 \cdot D} = \frac{2,44 \cdot 1,69}{2 \cdot 0,073} = 28 \text{ м}$$

Строим сечение водотока, определяем распространение концентрации загрязняющего вещества по длине и ширине водотока (табл.6.2).

Таблица 6.2- Сечения водотока по распространению концентрации загрязняющего вещества

До укрупнения $\Delta Z = 1,3$ м; $\Delta X = 28$ м.															После укрупнения $\Delta Z = 2,6$ м; $\Delta X = 112$ м.																	
															0	0	1															
															0	1	1	1	2													
															0	1	1	1	2	2	3											
															0	1	1	3	2	4	3	6	6									
															0	3	2	7	4	9	6	12	8	13	13							
															0	6	3	11	7	15	9	17	12	19	14	28						
															0	25	13	31	19	35	23	36	26	38	28	38	29	49				
															0	50	25	50	32	50	35	50	37	50	38	50	39	49	1	2	2	3
															100	50	75	50	69	51	66	50	63	50	62	50	61	50	2	2	3	4
															100	100	75	87	69	81	66	77	63	74	62	72	61	70	3	4	5	7
															100	100	100	88	93	82	88	77	85	74	82	72	79	70	6	8	10	13
															100	100	100	100	94	96	89	93	85	90	82	87	79	85	13	17	20	21
															100	100	100	100	100	97	98	93	96	90	93	87	91	85	28	31	33	34
															100	100	100	100	100	100	98	99	96	97	93	95	91	93	49	49	49	49
															100	100	100	100	100	100	100	99	99	97	97	95	95	93	70	67	65	63
																													85	81	78	75
																													93	89	85	81
$C_{\text{звс}}$	100	100	100	100	100	100	100	99	99	97	97	95	95	93	93	89	85	81														
$X$	0	28	56	84	112	140	168	196	224	252	280	308	386	264	364	476	588	700														

## Задание 7

### Экономический оптимум загрязнения окружающей среды

Научное определение параметров, характеризующих компромисс между экономическим развитием и экологической безопасностью, является серьезной проблемой современной экономики природопользования в русле концепции устойчивого развития. Для нахождения желаемого соотношения между этими двумя целями, необходима разработка моделей оптимального загрязнения окружающей среды. Для построения одной из таких моделей объединяются графики предельных природоохранных издержек и предельного эколого-экономического ущерба. Оптимальным для общества будет загрязнение окружающей среды в объеме, равном  $V$  (рис. 7.1). На графиках видно, что для нахождения равновесия между величиной ущерба и затратами на его предотвращение необходимо уменьшить присутствие загрязняющих веществ в окружающей среде на величину, равную отрезку  $VW$ . Если стремиться к предотвращению загрязнений в большем объеме, то экологические издержки превысят выигрыш от охраны окружающей среды в виде предотвращенного ущерба (слева от объема  $V$  получим  $MC > MD$ ). Такое соотношение показывает неэффективное распределение ресурсов, т. е. неоправданное изъятие ресурсов из производственной сферы в пользу природоохранной деятельности. Справа от  $V$ , наоборот, экологические издержки недостаточны, и это ведет к чрезмерному загрязнению окружающей среды. В этом случае ресурсы общества выделяются преимущественно на экономическое развитие, и в результате ухудшается экологическая ситуация.

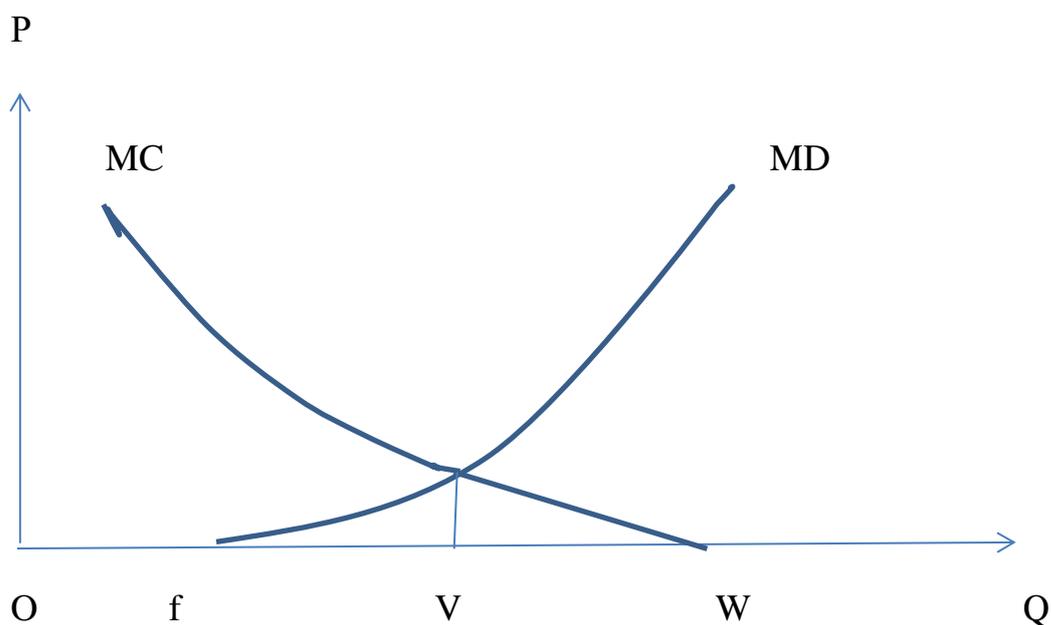


Рис. 7.1. Оптимальный уровень загрязнения окружающей среды  
(по Васильевой Е.Э., 2002)

где  $P$  – это издержки в денежном выражении;

$Q$  – объем загрязнения окружающей среды в натуральных единицах;

$MC$  – кривая предельных природоохранных издержек;

$MD$  – кривая предельного ущерба;

Точка  $f$  соответствует пороговой нагрузке на окружающую среду;

Точка  $W$  соответствует максимальному объему загрязнений;

Оптимальным для общества будет загрязнение окружающей среды в объеме, равном  $V$ .

С помощью данной модели можно наглядно показать, что в равной степени экономически невыгодна и чрезмерная, и недостаточная природоохранная деятельность.

Экономический оптимум загрязнения окружающей среды может послужить хорошим ориентиром, при выборе общества между экономическими и экологическими целями, в условиях ресурсного ограничения.

Кроме того, модель можно интерпретировать не только для загрязнения окружающей среды, но и для любого другого варианта ее использования.

**Задача 7.1** Найдите точку экономического оптимума загрязнения окружающей среды и рассчитайте общие экологические издержки в точке экономического оптимума загрязнения, если в результате производственного процесса образуется масса  $W$ , тонн условных отходов.

Таблица 7.1- Исходные данные по вариантам

Варианты	1	2	3	4	5	6
Показатель $W$ , т	9	10	11	12	13	14

### Решение

В результате производственного процесса образуется  $W = 10$  т условных отходов. Известно, что функция ущерба, наносимого выбросами отходов в окружающей среде, имеет вид  $U(V) = 4 \cdot V^2 + 20$  (тыс. руб.), а функция природоохранных затрат на очистку отходов от вредных примесей имеет следующий вид:  $Z(x) = 8 \cdot x + x^2$  (тыс. руб.).

1. Для нахождения точки экономического оптимума загрязнения мы должны свести общие экологические издержки общества к минимуму, тогда:

$$K(V) = U(V) + Z(x) \rightarrow \min,$$

$$K(V) = 4V^2 + 20 + 8x + x^2 \rightarrow \min.$$

Согласно условию оптимальности, мы можем записать

$$K(V) \rightarrow \min, \text{ если } dU(V) / dV = dZ(x) / dx,$$

$$\text{причем } x = W - V,$$

где  $W$  – объем отходов, образовавшихся в результате технологического процесса ( $W = 1, 2, 3 \dots n$ ), т;

$V$  – объем выбросов вредных веществ, поступающих в окружающую среду ( $V = 1, 2, 3 \dots n$ ), т;

$x$  – объем уловленных вредных примесей ( $x = 1, 2, 3 \dots n$ ), т;

$Z(x)$  – суммарные затраты на обезвреживание вредных примесей в объеме  $x$ , тыс. руб.;

$U(V)$  – ущерб, наносимый окружающей среде выбросами вредных веществ в объеме  $V$ , тыс. руб.;

$K(V)$  – общие экологические издержки общества от загрязнения окружающей среды, тыс. руб.;

$dZ(x)/dx$  – предельные затраты на обезвреживание  $x$  т вредных примесей, тыс. руб.;

$dU(V)/dV$  – предельный ущерб от выбросов вредных веществ в объеме  $V$ , тыс. руб.

Таким образом,  $(4 \cdot V^2 + 20)' = (8 \cdot x + x^2)'$ .

Далее получим

$$8 \cdot V = 2 \cdot x + 8.$$

Согласно зависимости  $x = W - V$ , запишем

$$8 \cdot V = 2 \cdot (10 - V) + 8,$$

а затем решим полученное уравнение:

$$10 \cdot V = 20 + 8, \text{ где } V = 2,8 \text{ т}$$

Оптимальный объем выбросов отходов в окружающую среду составит 2,8 т условных отходов.

2. Тогда оптимальный объем улавливаемых отходов будет равен

$$x = 10 - 2,8 = 7,2 \text{ (т)}.$$

3. Рассчитаем общие экологические издержки в точке экономического оптимума загрязнения

$$K(V_{\text{опт}}) = U(V_{\text{опт}}) + Z(X_{\text{опт}});$$

$$K(V) = 4V^2 + 20 + 8x + x^2$$

$$K(2,8) = (4 \cdot (2,8)^2 + 20) + (8 \cdot 7,2 + (7,2)^2)$$

$$K(2,8) = 51,36 + 109,44 = 160,8 \text{ (тыс. руб.)}.$$

**Вывод.** Таким образом, общий ущерб, наносимый окружающей среде выбросом отходов в объеме 2,8 т, составляет 51,36 тыс. руб., а общие затраты на очистку 7,2 тонн вредных примесей, содержащихся в 10 т отходов, равны 109,44 тыс. руб., следовательно, общие экологические издержки в точке экономического оптимума составят 160,8 тыс. руб.

### Тесты

#### *по дисциплине: «Исследование систем природо-обустройства и водопользования»*

#### **1. Укажите показатель общей $\alpha$ -радиоактивности водопроводной воды**

1. 0,5 Бк/л
2. 1 Бк/л
3. 0,1 Бк/л
4. 0,001 Бк/л

#### **2. Какие показатели воды относят к органолептическим свойствам**

1. Окисляемость
2. Привкус
3. Общая жесткость
4. Мутность
5. Температура
6. Запах

#### **3. Каким прибором осуществляется отбор проб воды?**

1. Барометром
2. Батометром
3. Бутирометром
4. Лактоденсиметром

#### **4. Какие показатели воды относят к физико-химическим свойствам?**

1. Окисляемость
2. Аммиак

- 3.Общая жесткость
- 4.Мутность
- 5.Запах
- 6.Хлориды

**5.Какое количество воды необходимо для проведения полного санитарного анализа?**

- 1.5 л.
2. 10 л.
3. 2 л.
4. 1 л.

**6.Укажите допустимые колебания РН питьевой**

1. 5-7
2. 1-2
3. 6-9
4. 9-10
5. 2-3

**7.Укажите методику определения сухого остатка воды**

- 1.Титрование
- 2.Выпаривание
- 3.Осаждение
- 4.Окрашивание

**8. Какие проводятся мероприятия по улучшению качества воды?**

- 1.Основные и специальные
- 2.Общие и специальные
- 3.Основные, дополнительные, обеззараживание
- 4.Основные, специальные, комбинированные

**9. С помощью каких методов достигается коррекция химического состава воды?**

- 1.Отстаивание
- 2.Хлорирование
- 3.Фторирование
- 4.Фефторирование
- 5.Фильтрация

**10. С помощью каких методов достигается оптимизация эпидемиологических показателей воды?**

- 1.Фильтрация
- 2.Коагуляция
3. Хлорирование
- 4.Фторирование

5. Озонирование
6. Опреснение

**11. Укажите метод осветления воды**

1. Озонирование
2. Кипячение
3. Фильтрация
4. Хлорирование

**12. Для улучшения качества воды применяются**

1. Отстаивание
2. Замораживание
3. Фильтрация
4. Коагуляция
5. Насыщение газом

**13. Основные способы улучшения качества воды**

1. Обеззараживание
2. Опреснение
3. Фторирование
4. Осветление
5. Обезжелезивание

**14. Какова величина оптимальной жесткости питьевой воды по СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода»?**

1. Не более 7 мг экв/л
2. Не менее 7 мг экв/л
3. Не более 10 мг экв/л
4. 7 – 10 мг экв/л
5. Не более 10 ммоль/л

**15. Какие соединения используются в качестве коагулянтов?**

1. Сернокислый алюминий
2. Хлорное железо
3. Сернокислое железо
4. Бикарбонат алюминия
5. Гидроокись алюминия

**16. Что является первым этапом выбора дозы коагулянта?**

1. Определение общей жесткости воды
2. Определение устранимой жесткости воды
3. Определение активности раствора сернокислого алюминия (глинозема)
4. Определение прозрачности воды
5. Определение мутности воды

**17. Перечислите виды жесткости воды**

1. Общая
2. Карбонатная
3. Устранимая
4. Постоянная
5. Относительная
6. Максимальная

**18. Присутствие каких химических веществ обуславливает общую жесткость воды?**

1. Солей кальция и магния в сырой воде
2. Бикарбонатов кальция и магния в сырой воде
3. Гидрокарбонатов и карбонатов кальция и магния в кипяченой воде
4. Гидроокиси кальция и магния в сырой воде

**19. Присутствие каких химических веществ обуславливает устранимую жесткость воды?**

1. Солей кальция и магния в сырой воде
2. Бикарбонатов кальция и магния в сырой воде
3. Гидрокарбонатов и карбонатов кальция и магния в кипяченой воде
4. Гидроокиси кальция и магния в сырой воде

**20. Как влияют коагулянты на качество воды?**

1. Происходит осветление и обесцвечивание воды
2. Улучшаются все органолептические свойства воды
3. Улучшаются запах, привкус воды, нормализуется ее прозрачность
4. Уменьшается жесткость воды

**21. Какие реактивы необходимы для определения устранимой жесткости воды?**

1. Соляная кислота и метилоранж
2. Трилон В и аммиачный буфер
3. Соляная кислота и сернокислый алюминий
4. Серная кислота и хлорид железа

**Критерии оценки тестовых заданий**

**Пример оценки тестовых заданий может определяться по формуле:**

Число правильных ответов студента

Оценка за тестир. = -----  $\times 100$

Всего правильных ответов в тестах

Оценочные баллы:

55-70 баллов – удовл.

71-85 баллов – хорошо

$\geq 86$  балла - отлично

## Библиографический список

1. Глушкова В.Г., Макара С.В. Экономика природопользования: учебник для бакалавров. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2013. 588 с.
2. Экономика природопользования: рабочая тетрадь / Нац. исслед. Томский политехнический ун-т. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 35 с
3. Демина О.Н. Разработка методов расчета, проектирования и эксплуатации отстойников и систем инженерной защиты водных объектов от стока, образованного при таянии загрязненного снега: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Московский гос. ун-т природообустройства. М., 2010. 22 с.
4. Зырянова У.П., Кузнецов В.В., Лазарев В.Н. Экономика природопользования и природоохранной деятельности: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2011. 183 с.
5. Оценка воздействия вредных веществ на окружающую среду: метод. указания к курсовой работе по инженерной экологии для студентов специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды» / сост. О.В. Плешакова. Омск: СибАДИ, 2011. 24 с.
6. Овчинников А.Б. Эколого-экономическая оценка и экспертиза водных объектов: учеб.-метод. пособие для студ. очной и заочной формы обучения, обучающ. по направлению 20.03.02 – «Природообустройство и водопользование». Саратов: Изд-во Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова, 2016.
7. Шабельникова В.В. Практикум по экономике природопользования: учеб. пособие / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ, 2011.

Учебное издание

Демина Ольга Николаевна  
Зверева Людмила Алексеевна

Исследование взаимодействия природных  
и природно-технических систем

Учебно-методическое пособие

для студентов направления подготовки

20.04.02 – Природообустройство и водопользование

Редактор Осипова Е.Н.

---

Подписано к печати 19.11.2020 г. Формат 60x84. 1/16.  
Бумага офсетная. Усл. п. л. 3,66. Тираж 25 экз. Изд. № 6750.

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета  
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ